

セメント産業における副産物の 利用促進に関する研究

和田 光永¹・ハンマード アミン²

¹学生会員 名古屋大学工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学工学研究科土木工学専攻 (同上)

セメント製造は焼成・粉碎工程で多量のエネルギーを消費するため、多量のCO₂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節約でき、CO₂排出量を減らすことができる。本研究では、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。また環境税の導入が混合セメントの利用促進に与える影響についても検討を行う。

Key Words : by-product, blast furnace cement, fly ash cement, GIS

1. 序論

社会資本形成のための重要な基礎資材であるセメントの製造には多量のエネルギーを必要とし、それに伴って多量の CO₂ を排出している。セメント産業全体の CO₂ 排出量は年間 1,560 万 t-C で国内総排出量の 6.5% に相当する¹⁾。

したがって、セメント産業においても、省エネや CO₂ 排出量低減の対策として種々の取り組みが行われているが、その一つとしてフライアッシュや高炉スラグのセメント混合材としての利用があげられる。石炭火力発電の副産物であるフライアッシュ及び粗鋼生産の副産物である高炉スラグを混合した混合セメントは、セメント製造に必要な石灰石の使用量やエネルギー消費を節約でき、その結果として CO₂ 排出量を減らすことができる。また現在、廃棄物処分場の逼迫が深刻な問題となっているが、フライアッシュ等を副産物として有効利用することにより、廃棄物処分場で処分される廃棄物量を削減できる。

しかし、現状では全セメント生産量に占める混合セメントの割合は約 20% にとどまっており、その大部分は高炉スラグを混合した高炉セメントが占めている。フライアッシュは、今後新規石炭火力発電所が建設されることにより、数年後には発生量が倍増する見込みであるが、図-1²⁾ に示すように、フライアッシュの有効利用は進んでいない。また、フライアッシュセメントの全セメント量に占めるシェアは約 1% であり、セメント産業にお

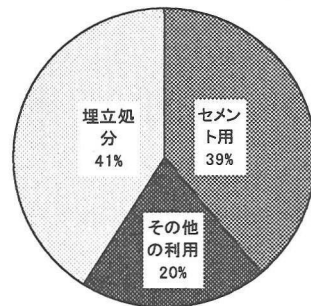


図-1 フライアッシュの利用状況
(98年度発生量 4,478 千 t)

ても利用拡大が進んでいない。よって、フライアッシュセメントや高炉セメントのシェア拡大の余地は十分にあり、環境負荷低減に大きく貢献する可能性を有しているといえる。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。図-2、図-3 を見て分かるように、地域によって石炭灰発生量とクリンカ製造能力に偏りがあるため、混合セメントの生産拡大をはかっていくには地域内だけではなく、地域間における需要と供給の関係を考慮していくことが必要である。その際に、効率の悪い輸送はコストがかかるため、その結果としてリサイクル

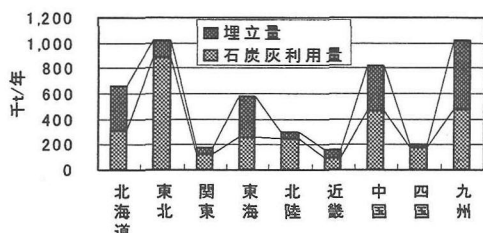


図-2 地域別石灰灰発生量³⁾

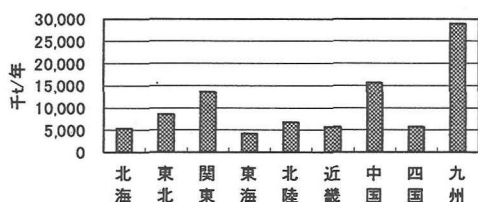


図-3 地域別クリンカ製造能力²⁾

が進まないということになる。よって地域間における効率のよい輸送が求められる。

そこで本研究では、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、副産物発生源と各セメント工場の間のリサイクル関係を距離及び副産物運搬量を考慮してモデル化した副産物リサイクル計画モデルを考える。さらに、セメント製造によるコストの最小化を目的としてモデルの定式化を行い、地理情報システム (Geographic Information System ; GIS) と最適化手法を用いて、最適な副産物運搬量を求める。

また環境税の導入により、環境悪化等の外部不経済が市場価格に反映された場合、セメント産業における副産物利用の経済性、混合セメント拡大への影響について評価する。

2. 混合セメントの製造工程

混合セメントは、混合材とクリンカに石こうを加えて混合粉碎するか、別々に粉碎して均一に混合して製造する。図-4 から分かるように、クリンカの製造が焼成工程を必要とするのに対し、フライアッシュや高炉スラグは焼成工程を必要としないため、これらを混合した分だけエネルギー消費が節約され、石灰石の使用量も低減できる。したがって、混合セメントはポルトランドセメントに比べて CO₂ の排出量を抑制できる。ポルトランドセメント、フライアッシュセメント、高炉セメントそれぞれ 1t の製造に必要な原燃料と炭素換算 CO₂ 排出量は表-1⁴⁾ のようになっている。CO₂ の排出量を比較してみると、ポルトランドセメントに比べてフライアッシュセメントは約 20%、高炉セメントは約 44% の CO₂ 排出量が削減されるとい

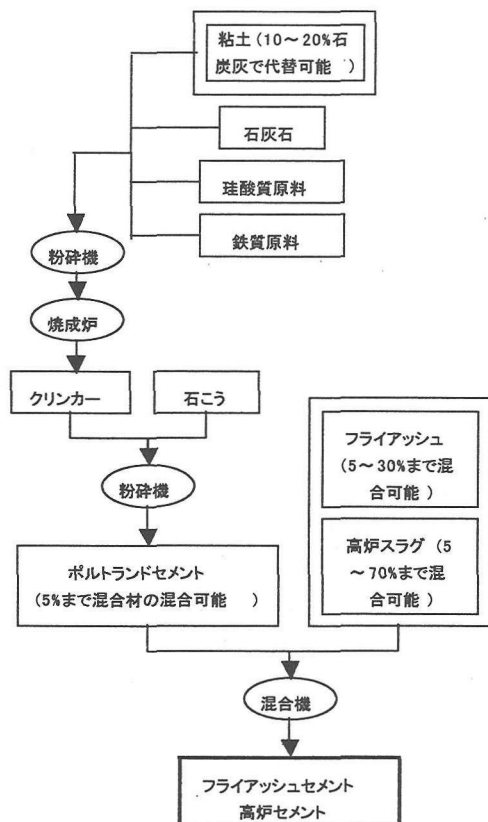


図-4 混合セメントの製造過程

表-1 各セメント 1t の製造に必要な石灰石・電力・石炭エネルギーと CO₂ 排出量⁴⁾

セメント種類	石灰石 (t)	電力 (kWh)	石炭エネルギー (Mcal)	CO ₂ 排出量 (t-C)
ポルトランドセメント	1.15	103	1,064	0.201
フライアッシュセメント (混合率 20%)	0.92	83	851	0.161
高炉セメント (混合率 50%)	0.58	88	654	0.112

うことになる。

3. 副産物リサイクル計画モデル

(1) モデルの考え方

ある地域に、 $I_1, I_2, \dots, I_j, \dots, I_n$ といった複数の産業が存在し、この地域内に各産業 I_i の工場である $A_{i,1}, A_{i,2}, \dots, A_{i,j}, \dots, A_{i,m}$ が複数存在すると仮定する。セメント産業における副産物リサイクル計画モデルの概念図は図-5 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。工場間の距離 $d_{i,j,k}$ は GIS を用いた最適経路解析によって検索する。また副産物運搬量 $x_{i,j,k}$ は、このモデルを定式化し、GIS により求めた距離 $d_{i,j,k}$ を用いて、最適化手法により決定する。

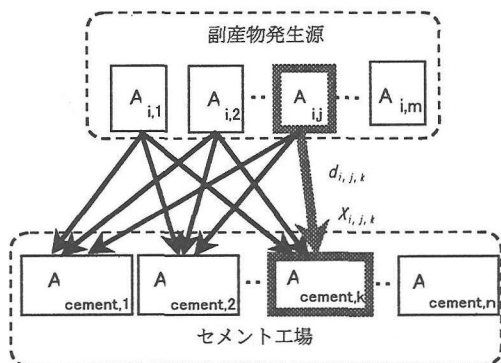


図-5 産業間のリサイクルの概念図

(2) モデルの定式化

セメント工場の利益を、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利益の合計として定義する。ある種類のセメントに関する利益とコストは以下のようなものを考える。

- ① セメント販売による利益：セメントの価格から製造コストをひいたものを利益として考える。
- ② セメント製造のための原燃料コスト：処女材料のコストは石灰石の価格のみを考えることとし、燃料は石炭、電力の消費に伴うコストを考える。
- ③ 副産物利用に伴うコスト：フライアッシュや高炉スラグをセメントの混合材として使用する場合、各副産物の価格や、副産物が産出される場所からセメント工場までの輸送コストを考える。
- ④ 環境汚染に伴うコスト：環境税の導入を考えた場合、CO₂ 排出にかけられる税をコストとして考える。

したがって、ある種類のセメントを1t生産することによる利益は、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）の合計を、このセメントの価格からひいたものになる。混合セメントはどの工場でも、混合セメントに対してフライアッシュ及び高炉スラグが、

それぞれ $\alpha : 1$ 及び $\beta : 1$ の比率で混合されているものとする。副産物の輸送コストに関しては、実際には輸送距離に単純に比例するものではないが、今回のケースでは比例すると仮定した。セメント産業全体の利益を最大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：

$$\sum_k C_k \rightarrow \max \quad (1)$$

$$C_k = C_{k0} + C_{k1} + C_{k2} \quad (2)$$

$$C_{k0} = c_0 \{ K_k - (\alpha \sum_j x_{1,j,k} + \beta \sum_j x_{2,j,k}) \} \quad (3)$$

$$C_{k1} = \sum_j (\alpha c_1 - u d_{1,j,k}) x_{1,j,k} \quad (4)$$

$$C_{k2} = \sum_j (\beta c_2 - u d_{2,j,k}) x_{2,j,k} \quad (5)$$

制約条件：

$$\sum_k x_{i,j,k} \leq W_{i,j} \quad \text{for all } i, j \quad (6)$$

$$\alpha \sum_j x_{1,j,k} + \beta \sum_j x_{2,j,k} \leq K_k \quad \text{for all } k \quad (7)$$

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 の利益の合計、 C_{k0}, C_{k1}, C_{k2} ：工場 k におけるポルトランドセメント、フライアッシュセメント、高炉セメント生産による利益、 c_0 ：ポルトランドセメント1tの製造による利益、 c_1, c_2 ：フライアッシュセメント、高炉セメント1tの製造による利益（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、 α, β ：混合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 $\alpha : 1$ 及び $\beta : 1$ の比率で混合、 u ：副産物輸送1t・km当たりの輸送コスト、 $W_{i,j}$ ： 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。式 (1) はセメント産業全体での利益最大化問題を表し、式 (2) はセメント工場 k における利益の合計を表している。式 (3) ~ (5) はそれぞれ工場 k におけるポルトランドセメント、フライアッシュセメント、高炉セメントの生産による利益を表している。以上が目的関数に関する式であり、制約条件は式 (6) で副産物供給量に関する制約、式 (7) で各セメント工場の副産物受け入れに関する制約条件を表している。

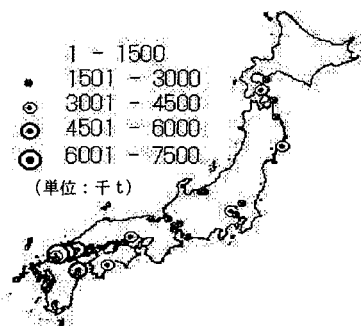


図-6 各セメント工場の位置とクリンカ製造能力

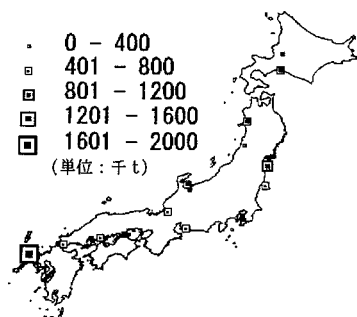


図-7 石炭火力発電所の位置とフライアッシュの発生規模

4. ケーススタディ

(1) GISによる最短経路検索

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地図上にポイントとして入力する。図-6,7には、各セメント工場、石炭火力発電所の位置とそれぞれのクリンカ製造能力と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の間の最短経路とその距離 $d_{i,j,k}$ を検索する。地図データ及び道路データはDigital Chart of the World⁵⁾を使用した。また、各工場のデータは統計資料^{2) 3) 6)}を参考にした。ネットワーク解析は、GISソフトArcView⁷⁾の拡張モジュールであるNetwork Analyst⁸⁾を用いて行った。電力会社のフライアッシュを扱う関係会社にヒアリングを行った結果、フライアッシュの運搬は主にジェットパック車と呼ばれるトラックにより行われているとのことであった。よって今回のケーススタディではトラックによる運搬のみを考えたが、今後は運搬コストの削減のため、船による輸送も考慮していく必要がある。

(2) モデルの実行条件

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を、表-2 に示す。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スタディでは、リサイクル計画に関して一年単位で考えているため、値を設定する際には年度平均値を参考にした。

各セメント1tの製造によるCO₂排出量については表-1の数値を用いた。 K_k 、 $W_{i,j}$ の値は各産業が公表しているデータ^{2) 3) 6)}を使用した。ここで、フライアッシュの発生量は数年後には倍増することを考慮して、各発電所において発生量を実際の値の2倍に設定した。また副産物輸送t・km当たりの

CO₂排出量については文献9)を参考に設定した。また石灰石、フライアッシュ、高炉スラグの価格は文献10)を参考に設定した。フライアッシュ及び高炉スラグは、セメント混合材として用いられる場合、セメント工場受け渡しの価格として市場価格が存在するが、現状として特にフライアッシュは電力会社とセメント会社の契約により価格が決まっている。今後発生量が倍増すること、普及が進むことなどにより市場価格が変化すると考えられる。

表-2 計算に用いた値

項 目	数 値
ポルトランドセメント1tの製造によるCO ₂ 排出量	0.20 t-C/t
フライアッシュセメント1tの製造によるCO ₂ 排出量	0.16 t-C/t
高炉セメント1tの製造によるCO ₂ 排出量	0.11 t-C/t
副産物輸送t・km当たりのCO ₂ 排出量	8.1×10^{-5} t-C/t・km
フライアッシュセメントの混合率, α : 1	5 : 1 (20%混合)
高炉セメントの混合率, β : 1	2 : 1 (50%混合)
工場kのセメント製造能力, K_k	1999年時点の製造能力
i産業のj工場における副産物産出量, $W_{i,j}$	発電所:1995年の発生量の2倍 鉄鋼工場:1995年の発生量
石灰石価格	1,000 (円/t)
フライアッシュ、高炉スラグ価格(輸送コストを含まない)	1,000 (円/t)
電力価格	20 (円/kwh)
石炭価格	0.77 (円/M cal)
セメント価格	9,000 (円/t)
副産物輸送コスト, u	20 (円/t・km)

本モデルでは産出元での価格を一定とし、輸送価格は輸送距離に比例するものと仮定した。また電力価格は文献 11)を、石炭価格は文献 2)をそれぞれ参考に設定した。ポルトランドセメントの価格は混合セメントより高いが、今後混合セメントの材料特性の改良や混合セメントの普及によってポルトランドセメントとほぼ同じ価格になると仮定し、今回のケースでは各セメントを同じ価格とした。輸送コスト u の関しては文献 12)を参考に値を設定した。また環境税の設定は、他の環境税導入国の税率と文献 13)を参考に 3,000 円/t-C、6,000 円/t-C の二つのケースを設定した。

表-2 の値を用いることにより、 u , c_p , c_f , c_c の値は表-3 のようになる。

表-3 輸送コストと各セメントの製造による利益

環境税	0	3000 (円/t-C)	6000 (円/t-C)
副産物輸送コスト, u (円/t・km)	20	22.4	24.8
ポルトランドセメント1tの製造による利益, c_p (円/t)	4,961	4,368	3,711
フライアッシュセメント1tの製造による利益, c_f (円/t)	5,565	5,082	4,599
高炉セメント1tの製造による利益, c_c (円/t)	5,665	5,319	4,983

(3) 利益最大化を目的としたモデルの実行

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。

図-8,9 は、現状における混合セメントの割合や CO_2 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-8 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結果により、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 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るため、混合セメントの割合が増えるということがいえる。

CO_2 排出量に関しては、図-9 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% 削減された。また環境税がない場合、現状と比べてモデルのシミュレーションの結果、混合セメン

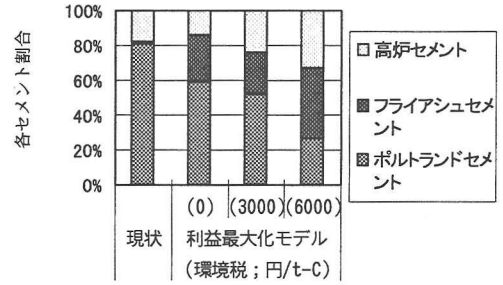


図-8 現状と利益最大化モデルを実行した場合の各セメント割合

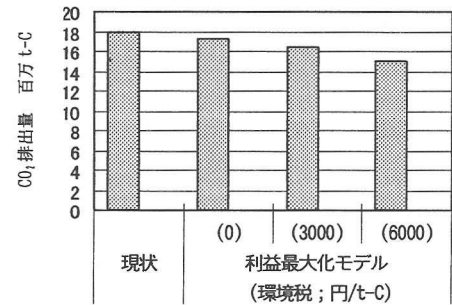


図-9 セメント産業全体の CO_2 排出量

トの生産量が増えたため、 CO_2 排出量も現状と比べ少なくなっている。輸送の際の CO_2 排出量は、環境税が 6,000 円/t-C の場合で見ると全体の排出量の約 2.3%を閉めるという結果となった。この結果から、輸送による CO_2 排出はセメント製造による CO_2 の総排出量から見て非常に小さいといえる。

モデルを実行した結果、ある副産物発生源から各セメント工場へそれぞれどれだけの副産物が運

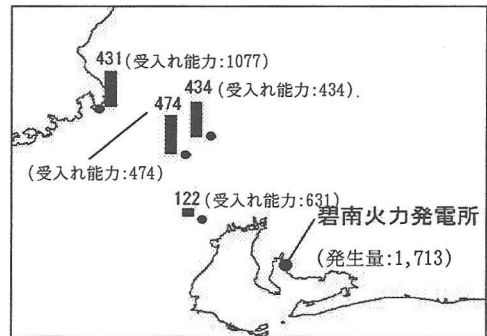


図-10 モデルのシミュレーションによる碧南火力発電所からセメント工場への副産物運搬量 (単位: 千 t / 年)

搬されたかがわかる。図-10には、中部地方にある碧南火力発電所から産出されたフライアッシュがどのセメント工場にどれだけ運ばれたかを示したものである。この結果は、環境税が6,000円/t-Cと設定されたときのモデルのシミュレーション結果である。この結果を見ると、碧南火力発電所から発生するフライアッシュのうち、約85%がセメント工場に運ばれている。また各セメント工場の受入れ量は、例えば最遠地点のセメント工場の碧南火力からの受入れは431千tで、全体の受入れ能力の約40%であり、他の発電所からも受入れている。

5. 結論及び今後の課題

今回の研究では、フライアッシュ及び高炉スラグのセメント工場へのリサイクル計画をモデル化することにより、混合セメントの生産拡大により実現可能な環境負荷低減効果の検討を行った。その結果により以下のような結論が得られた。

- (1) フライアッシュ等の副産物の利用現状、セメント産業におけるリサイクル現状を把握することにより、混合セメントの生産拡大に向けての課題を明らかにした。
- (2) 環境税の導入により、負の外部経済がセメント製造コストに反映された場合の混合セメントの経済性を示した。具体的には、利益最大化を目的とした場合のモデルのシミュレーションの結果、3,000 円/t-C、6,000 円/t-C の炭素税の導入により、混合セメント生産割合が導入前と比べてそれぞれ約 10%、約 33%増加した CO₂ 排出量については、それぞれ約 4.5%、12.4%削減されるという結果となった。

今後の課題としては、今回のケースでは輸送面でトラックによる輸送のみを考えたが、更なる輸送コストの低減及び混合セメントの生産拡大を目指すためには、船や列車による輸送も考慮していく必要がある。また輸送コストを距離に比例する

ものと仮定して計算を行なったが、実際は単純に比例するものではないので、今後は輸送コストに関して詳しく扱う必要がある。

また今回のケーススタディではセメント産業全体の利益最大化を考えてきたが、今後は各工場、各会社の利益も考慮したりサイクルを考えていく必要がある。

参考文献

- 1) 環境庁企画調整局地球環境部：地球温暖化防止ハンドブック 2 産業編、第一法規出版株式会社、1992
- 2) セメント協会：セメントハンドブック、1999
- 3) 日本フライアッシュ協会：石炭灰、1999
- 4) 水口裕之・斉藤寛之：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、1995
- 5) Environmental System Research Institute, Inc. : Digital Chart of the World, 1993
- 6) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの特性と有用性、1999
- 7) ESRI : ArcView GIS ユーザーズ・ガイド、1999
- 8) ESRI : ArcView Network Analyst ユーザーズ・ガイド、1999
- 9) 運輸省運輸政策局情報管理部：運輸エネルギー要覧 平成 10 年度版、1999
- 10) 建設物価調査会：建設物価 平成 11 年 1 月号、1999
- 11) 総務庁統計局：小売物価統計調査年報 平成 10 年、1999
- 12) 運輸省運輸政策局情報管理部：陸運統計要覧 平成 10 年度版、1999
- 13) 環境庁企画調整局企画調整課調査企画室：地球温暖化対策と環境税 「環境に係る税・課徴金等の経済的手法研究会」最終報告書、ぎょうせい、1997

Study on the Recycling Planning of Industrial By-products in the Cement Industry

Mitsunaga WADA and Amin HAMMAD

Cement production consumes large energy in the baking and crushing processes, which causes large CO₂ emission. It is possible to use fly ash and blast furnace slag as raw materials for the production of cement. Production of fly ash cement and blast furnace cement can reduce the consumption of limestone and energy, and reduce CO₂ emissions. In this research, a planning model for recycling by-products considering transportation impact is developed for evaluating environmental impact caused by increasing of blended cement. This model is implemented in a planning support prototype system using a geographic information system (GIS) and an optimization software. Furthermore, this study shows the impact of environmental tax on the production of blended cement.