

## 東京都区部における焼却主灰のセメント資源化モデル

飯野成憲・荒井康裕\*・稲員とよの\*・小泉 明\*

(\*首都大学東京大学院)

\*\*\*\*\*

【要約】東京 23 区における焼却主灰の最適なセメント資源化方法を検討するため、モデルを考案した。既存セメント工場の焼却主灰受入余力は年間 28 万トンと推定された。既存セメント工場及び新設エコセメント工場のベストミックスによるコスト最小化モデルでは、近距離ではトラック、遠距離では船舶及びトラックによる輸送が選択された。一方コストに加え便益も含めると、東京 23 区は既存セメント工場での処理量を段階的に増やすのではなく、早期に他自治体とのエコセメント工場の共同処理を検討することが望ましいことがわかった。

\*\*\*\*\*

### 【目的】

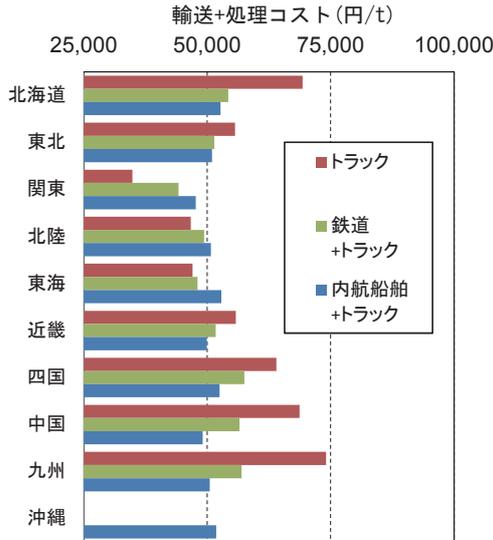
一般廃棄物最終処分場の延命化を目的に、東京 23 区では焼却主灰（以下、「主灰」という）を既存のセメント工場で原料化する事業が開始された。一方、多摩地区では国内唯一のエコセメント工場が稼働している。エコセメントは、セメント 1t に対し廃棄物を 500kg 以上原料として使用し、セメント製造において問題となる塩素濃度の基準が一般のセメントに比べて緩和されている。東京 23 区における最適な焼却主灰の輸送方法、エコセメントシステムの導入可能性について経済的な側面から評価するとともに、東京 23 区単独処理だけでなく、他県との共同処理システムについても検討したので報告する。

### 【方法】

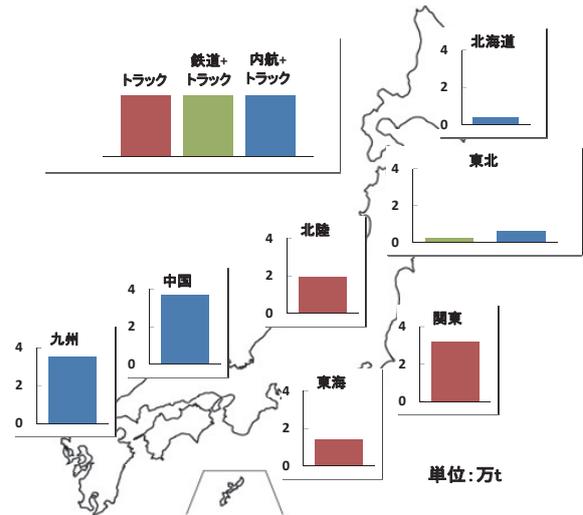
- (1) 既存セメント工場における主灰受入余力の推定 主灰の化学成分及びセメントクリンカの品質管理項目である水硬率、珪酸率等を考慮した数理計画法の生産計画問題として定式化し、主灰受入余力を推定した。
- (2) 既存セメント工場利用及びエコセメント工場の新設における主灰資源化コストの試算 既存工場を活用する場合、東京 23 区から全国の既存工場への主灰輸送コスト及び処理委託コストを推定した。輸送方法は、トラックのみの場合、モーダルシフトを考慮した鉄道+トラック、及び内航船舶+トラックの 3 パターンとした。東京 23 区にエコセメント工場を新設する場合、主灰はトラックのみとし、輸送、処理、建設コストを試算した。
- (3) 既存セメント工場及び新設エコセメント工場のベストミックスを目的とした主灰処理計画モデル コスト最小化を目的とした、既存工場の利用とエコセメント工場の新設の最適な組み合わせモデルを考案した。
- (4) 新設エコセメント工場による共同処理システム分析 東京 23 区から排出される主灰の最大量を 15 万 t、また他県からも主灰が輸送され計 30 万 t、50 万 t、100 万 t を共同処理した場合のコストを試算した。最終処分費用の削減、既存の最終処分場の延命、新規処分場確保の回避を便益項目とした費用便益分析を実施した。

### 【結果の概要】

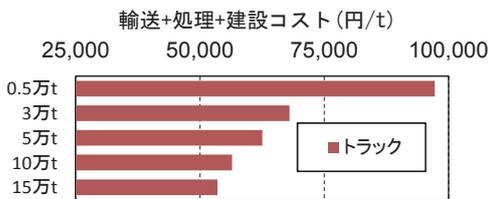
- (1) 既存セメント工場における主灰受入余力 既存セメント工場での受入余力は年間 28 万 t と推定された。
- (2) 既存セメント工場利用及びエコセメント工場の新設における主灰資源化コスト 既存工場を活用する場合、東京 23 区から関東、北陸、東海へはトラックのみによる輸送が、北海道、東北、近畿、四国、九州へは内航+トラックによる輸送が有利であった (図 1)。主灰をエコセメント原料として活用する場合、処理量の増加に伴いコストは低下し、全量をエコセメント原料とする場合には約 5.3 万円/t-主灰であった (図 2)。
- (3) 既存セメント工場利用及び新設エコセメント工場のベストミックスによる最適解 図 3 の処理モデルにより、総コストを処理量別 (0.5 万 t、3 万 t、5 万 t、10 万 t、15 万 t) に計算したところ、いずれもエコセメント工場は選択されなかった。東京 23 区から排出される最大量の主灰 (15 万 t) を処理する場合、鉄道による輸送はトラックへの積替コストが大きいことから、東北地方向けのみで選択された。トラックによる輸送は道路輸送距離が約 400km 程度までであり、それ以上の場合、ほぼ内航船舶が選択された (図 4)。
- (4) 新設エコセメント工場による共同処理システムの提案 東京 23 区から排出された主灰を処理する場合、スケールメリットにより総コストは低下した。他県から排出された主灰を処理する場合、処理量が 15 万 t より 35 万 t の方が総コストは減少し、85 万 t では、内航船舶を利用しても総コストは増加した (図 5)。費用便益分析の結果、東京 23 区単独で既存セメント工場を利用する場合、処理量が増加するに従い便益/費用は減少した。エコセメント工場を新設する場合、処理量の増加、共同処理により東京 23 区の便益/費用は増加した一方、処理量の増加とともに他県の便益/費用は減少した (図 6)。よって東京 23 区は既存セメント工場での処理量を段階的に増やすのではなく、早期に他自治体とのエコセメント工場の共同処理を検討することが望まれる。



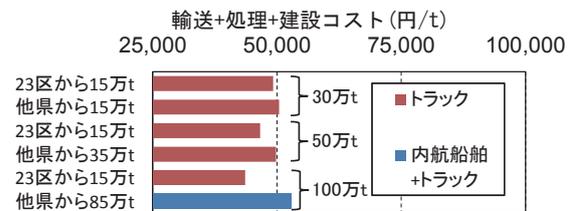
**図1 全国既存セメント工場への輸送+処理コスト**  
 東京 23 区から関東、北陸、東海へはトラックのみによる輸送が、北海道、東北、近畿、四国、中国、九州へは内航船舶+トラックによる輸送が有利。



**図4 最大量の焼却主灰を処理する場合の最適解**  
 鉄道による輸送はトラックへの積替コストが大きいことから、東北地方向けのみで選択。トラックによる輸送は道路輸送距離が約 400km 程度までであり、それ以上の場合、ほぼ内航船舶が選択。東京 23 区単独処理の場合、エコセメント工場の新設は選択されない。



**図2 エコセメント工場新設時の輸送+処理+建設コスト**  
 東京 23 区から排出された主灰を全量エコセメント原料として活用する場合のコストは約 5.3 万円/t・主灰。

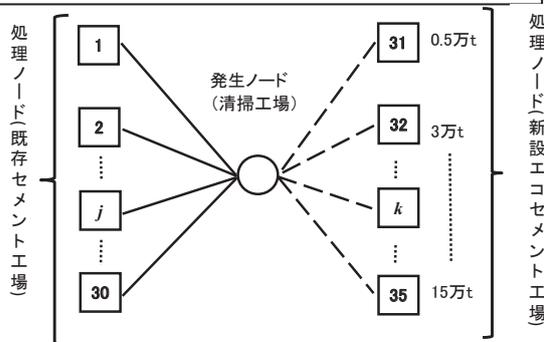


**図5 共同処理による集約型エコセメント事業実施時の輸送+処理+建設コスト**  
 100 万 t 処理の場合は内航船舶+トラック、その他の場合はトラックのみによる輸送を想定。東京 23 区の場合、処理量増加に伴い建設コスト負担が減少し、総コストは抑制。他県の場合、15 万 t 処理時より 35 万 t 処理の場合の方が総コストは減少。処理量が 85 万 t に増加した場合、内航船舶を利用しても総コストは増加。

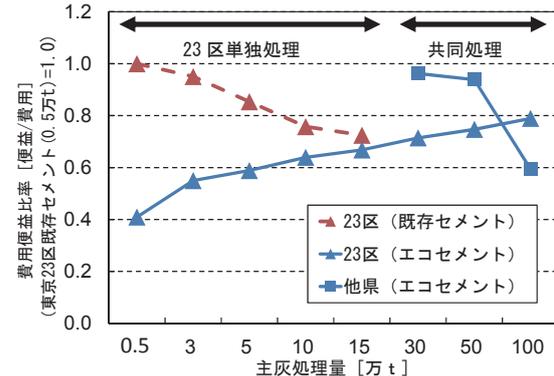
**【目的関数】**  
 Minimize.  $TC = \sum (a_j m_j + a_m m_t + a_s m_s) + \sum (a_k m_k z_k)$  (1)

**【制約条件】**  
 $z_k \in \{0, 1\}$  (2)  
 $\sum z_k \leq 1$  (3)  
 $\sum (m_j + m_t + m_s) + \sum m_k z_k = m_{total}$  (4)  
 $m_j + m_t + m_s \leq m_{max}$  (5)

TC: 総コスト, m: 輸送量,  $m_{total}$ : 目標総処理量,  $m_{max}$ : 受入余力  
 j: トラック, t: 鉄道+トラック, s: 内航+トラック  
 j: 既存セメント工場, k: 新設エコセメント工場, a: 単価



**図3 既存セメント工場と新設エコセメント工場のベストミックスによる主灰処理モデル**  
 (1)式第 1 項: 既存セメント工場利用時の輸送+処理コスト  
 第 2 項: エコセメント工場建設時の輸送+処理+建設コスト  
 (3)式: エコセメント工場は建設されないか、いずれかの規模で 1 つ建設されることを示す。



**図6 処理主体別の主灰処理量と費用便益の関係**  
 東京 23 区単独処理の場合は、いずれの処理量でも既存セメント工場の利用が有利。既存セメント工場を利用する場合、処理量の増加に伴い便益/費用は減少。エコセメント工場を新設する場合、処理量が増加するに伴い、便益/費用は増加し、他県との共同による処理では更に増加。他県の場合、処理量の増加とともに便益/費用は減少。

**【参考文献】** 飯野成憲, 荒井康裕, 稲員とよの, 小泉明: 都市及び周辺地域におけるごみ焼却主灰のセメント資源化システムに関するモデル分析, 土木学会論文集 G (環境), in press