

廃棄物処理等科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

- ・ 研究課題名 = 再生製品に対する環境安全評価手法のシステム規格化に基づく安全品質レベルの合理的設定手法に関する研究
- ・ 研究番号 = K1716, K1838, K1938

- ・ 国庫補助金精算所要額 (円) = 110,377,000

- ・ 研究期間 (西暦) = 2005-2007

- ・ 研究代表者名 = 大迫 政浩 (独立行政法人国立環境研究所)

- ・ 共同研究者名 = 貴田 晶子 (独立行政法人国立環境研究所), 遠藤 和人 (独立行政法人国立環境研究所), 肴倉 宏史 (独立行政法人国立環境研究所), 酒井 伸一 (京都大学), 東條 安匡 (北海道大学大学院), 宮脇 健太郎 (明星大学), 崎田 省吾 (県立広島大学), 坂本 広美 (神奈川県環境科学センター), 田野崎 隆雄 (太平洋セメント株式会社)

1. 研究目的

再生製品の利用拡大が進まない大きな原因は安全性に対する不安感であり、安全性について科学合理性をもって説明できる評価手法が確立、体系化されていないことによる。また、社会が要求する安全品質レベルを設定するには、需給バランスの変化による社会への様々な影響を勘案しなければならない。そこで、量的に多い建設資材系の再生製品を対象とした土壌・地下水への溶出リスクに焦点をあて、その性状や多様な利用形態による影響の違いを適切に評価でき、かつ長期的な外部環境変化に伴う影響など、目的に応じた複数

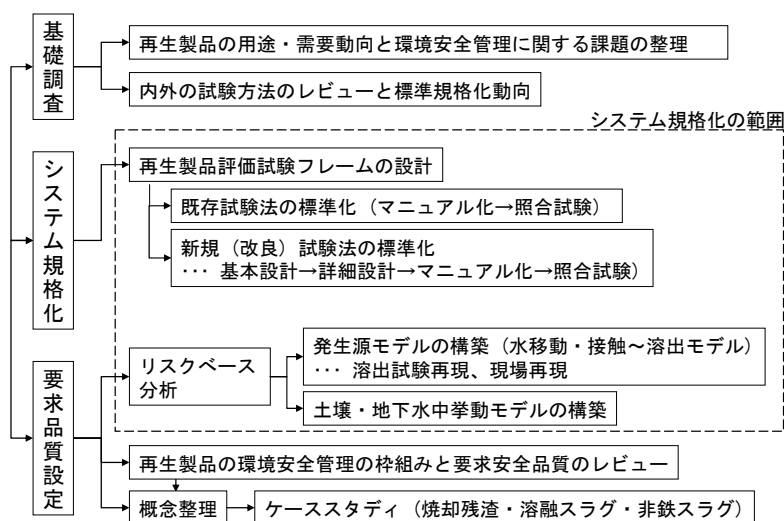


図 1 本研究の全体構成

の試験方法を設計し、実試料を用いた実験的検討等を行って妥当性を検証し、一連の試験群を体系的なシステム規格として提案する。また、一連の試験群から得られるデータを用いた土壌・地下水への影響予測手法を確立し、他の環境負荷とのトレードオフを勘案した合理的な安全品質レベルの設定の考え方を提示する。なお、本研究は図*のと通りの構成で行った。

2. 試験方法のシステム規格化に関する研究

2-1 建設系再生製品の環境安全評価試験システム規格化

2-1-1 環境安全評価フレームの設計

(1) 目的 再生製品の特性や利用環境は多様であるので、幾つかの環境安全評価試験を適切に適用し評価することが必要である。そこで、欧州における建設資材指令 (Construction Product Directive, CPD) の考え方や欧州規格 (CEN) 等を参考に、再生製品の利用シナリオや利用形態に応じた特性化試験を選択し、再生利用の際の環境安全性を評価するための基本的な考え方の枠組みである「環境安全評価フレーム」(以下、評価フレームと言う)を設計した。

(2) 評価フレームの構成 評価フレームは基本特性評価とシナリオベース評価の 2 段階で構成し、わが国や欧州で既に提示されている試験方法を適切に組み込むよう設計した。各段階の考え方は次のとおりである。基本特性評価: 再生材料や再生製品の基本特性として必須の試験法として、全含有量試験、環境最大溶出可能量試験、JIS K 0051 溶出試験 (または環告 46 号土壌溶出試験) を適用することとした。ここで全含有量試験は有害物質の絶対的な含有量を、環境最大溶出可能量試験は微細化や極端な pH 環境など過剰に過酷な環境条件での環境負荷を、JIS 法 (または 46 号法) は供用初期の溶出濃度をそれぞれ評価するものである。シナリオ評価: 再生製品の設置される環境条件、すなわち「使用シナリオ」を可能な限り詳細に記述し、それに基づいた適切な溶出特性化試験と物理試験を選択実施して得られたデータを挙動モデルによって解析し、評価することとした。選択項目となる特性化試験は環境暴露試験群と溶出挙動試験群で構成され、前者は乾湿サイクル試験、凍結融解サイクル試験、中性化促試験の 3 種類を予定しており、この中から有害物質に最も影響を及ぼす試験を実施する。そして環境曝露試験を終えた再生製品に適用する溶出挙動試験として、pH 影響を見るための pH 依存性試験と、溶出フラックスを求めるためのカラム通水試験とシリアルバッチ試験の中からいずれかを適用することとした。さらに、以上の評価フレームによって利用可能と評価された再生製品を環境中で利用していく際には、環境安全品質レベルを担保するための品質管理試験 (JIS 法や 46 号法レベルの簡単な判定試験を想定) を製品出荷段階などの際に一定頻度で実施していくことが必要である。

以下に、評価フレームを構成する各特性化試験の開発と規格化の成果を述べる。なお、本研究で作成した規格案は、廃棄物学会規格として公表される。

2-1-2 環境最大溶出可能量試験

すり減り操作を受ける利用環境や再々利用の繰り返しによって再生製品が微細化し、有害物質の挙動に最も影響を及ぼすとされる pH 環境 (pH 4, 7, 12 および自己 pH) に暴露されることによる最大溶出量を評価するための試験方法として、オランダ公定試験 NEN 7371 を原型として高アルカリ環境を付加した方法を提案し、個別試験の中では先行的に取り組みを進めた。数種類の再生材料について試験を適用した結果、攪拌強度や容器開口度の影響が大きいことを確認した。そこでこれらの条件を規定し、改良した試験方法に基づき精度評価を実施した。その結果、試験段階 (酸系列, アルカリ系列で別々に行われ, 各系列では溶出とろ過を 2 回行う) や測定元素によってばらつき方は異なるが、測定誤差 (例えば ICP-MS では同一試料液であっても変動係数 10%) を含めた値として室間の変動係数は概ね 20%程度かそれ以下であり、十分な精度を持つ試験法として確立できた。

2-1-3 pH 依存性試験

pH 依存性試験は pH に対する化学平衡濃度カーブ (溶解度曲線) を求めることが試験の目的となる。溶解度曲線とのフィッティングにより、関与する化学種を推定し、長期的な挙動を理論的に計算することが可能となる。その試験法として、欧州では連続調整式 (TS 12927) と初期添加式 (TS 14429) が提示されていることから、これらの適用性を検討した。まず、連続調整式により試料粒径と溶出時間の影響を検討し、化学平衡の観点から 1 mm 以下、48 時間に規定した。また、初期添加式は試験操作は簡単であるが pH を意図した値に調整するのが困難であるため、試薬添加量を決定するための予備試験法について検討を重ね試験データを蓄積し、予備試験法としての適用範囲を明確にした。

2-1-4 シリアルバッチ試験

溶出挙動評価を行うための試験であり、粒状物、成型体のいずれにも適用可能な方法として新規開発中である。溶液を交換して溶出操作を継続し、各画分の溶出濃度から溶出フラックスを求め、挙動モデルへの入力データを提供する。溶液の一部のみを採取し新たな溶媒を加える方法 (部分置換式) の試験規格案を作成し、各種再生製品に対する試験適用性を確認した。この方法は、カラム通水試験の簡易代替法としての提案を目指している。

2-1-5 カラム通水試験

粒状物からの溶出挙動を評価するための試験であり、シリアルバッチ試験と同様に、挙動モデルへの入力データを得るために行う。欧州規格 (CEN TS 14405) の適用性を検討し、流量の管理など難しい面は幾つかあるものの試験法として十分に実施可能であることを確認した。さらに、試料充填方法の試験精度への影響を評価し、規格案に反映させることが必要である。

2-1-6 環境暴露試験

環境暴露試験は「再生建材の循環利用過程における長期的な環境影響評価のための促進試験系の開発及び標準化に関する研究」(H16-18 環境省地球環境保全等試験研究) の凍結融解試験、中性化促進試験、乾湿繰り返し試験の成果を活用する。これらは溶出特性化試験の前操作として行う「気中暴露」と、溶出操作を伴う「水中暴露」に分けられるが、後者

については挙動モデルへの適用法を整理する必要がある。また、規定した暴露操作が実環境の劣化現象をどの程度促進しているかについて検討を重ねる必要がある。

2-1-7 まとめ

多様な再生製品の環境安全性を適切に評価するための基本的な考え方の枠組み（環境安全評価フレーム）を設計し、評価フレームを構成する個別特性化試験の開発と規格化を行った。このうち環境最大溶出可能量試験については十分な精度を持つ試験規格として確立することができた。その他の特性化試験方法についても着実に検討を重ね、試験規格案として提示できる段階となった。本研究で提案する規格案は、廃棄物学会規格として順次規格化されつつある。

2-2 再生プラスチックの環境安全評価試験法の開発研究

2-2-1 研究目的

プラスチックを使用した建設資材系の再生製品へ適用することを目的として、プラスチックに含まれる様々な物質の溶出特性化試験方法の設計およびその試験方法の適用可能性に関する検討を行った。プラスチックに添加剤等として含まれるビスフェノール A (BPA)、4-ノニルフェノール (NP) および 1,4-ジオキサンなどの親水性化合物と Pb および Sb などの金属類を対象とした。

2-2-2 研究方法

溶出特性化試験として、最大溶出可能量を把握するための含有量試験、pH 依存性試験および長期的な溶出挙動を把握するための連続バッチ試験の設計と適用可能性に関する検討を行った。

2-2-3 結果と考察

親水性化合物の含有量試験は混合溶媒または水による浸漬法が、金属類はマイクロウェーブ酸分解・ICP-発光分析 (AES) 法が適用可能であった。溶媒あるいは分解条件を変更することにより、様々な樹脂にも対応可能であった。また、pH 依存性試験は、pH を初期添加で調整する方法によって溶出挙動が確認出来た。ただし、セメント等の土木資材との混合製品への適用可能性については、実試料で再検討の必要がある。さらに、連続バッチ試験を行うことにより、各種材料から溶出するそれぞれの物質について、おおよその長期的挙動が把握可能であった。

2-2-4 まとめ

今回、再生プラスチックの環境安全性を評価するための試験方法として設計した 3 種類の溶出特性化試験（含有量試験、pH 依存性試験および連続バッチ試験）は、詳細条件の変更によりプラスチックに含まれる多くの有機系および無機系添加剤等の溶出挙動を確認することが可能であった。今後は実際の試料に適用してデータを集積することが重要であり、そのリスクを踏まえて安全レベルの議論を進める必要がある。

2-3 環境暴露促進試験（乾湿繰り返し実験）における六価クロムの溶出挙動

2-3-1 研究目的

現在、土木資材として用いられる再生製品については、土壤環境基準に準拠して溶出試験による評価が行われている。また、環境基準項目の一つである、六価クロムなど酸化状態により有害性が異なる元素については、長期的に周囲の雰囲気（酸化還元電位）の変化により、溶出量が増加する可能性も推測される。実験的に添加し三価クロムが酸化し六価クロムが溶出することも報告されている。本課題では、再生埋め戻し材（フェロシルト）を用いて、使用状況を模擬した乾湿繰り返し試験における六価クロム溶出傾向について検討を行った。

2-3-2 研究方法

1) 試料 再生埋め戻し材（フェロシルト）について、施工現場より掘削採取された試料を用いた。試料は、シルト質粘性土に類似し（含水率 46.3%）、乾燥すると固結した。

2) 乾湿繰り返し試験（環境暴露促進試験）

(1) 実験方法 自然環境での湿潤乾燥を想定した乾湿繰り返し実験を実施した。本実験では湿潤乾燥を促進的に実験室にて実施した。また試験の再現性の面から、乾燥状態を 105°C での絶乾とした。これを 20 回繰り返した。乾湿繰り返しを行なった試料について次の分析を実施した。(a) 全含有量 (b) 溶出試験（環境庁告示 46 号） (c) 土壌含有量試験（環境省告示 19 号） (d) pH 依存性試験

2-3-3 結果及び考察

酸化還元電位 (Eh) および重金属の溶解に関係する pH について確認したが、乾湿繰り返しの回数と酸化還元電位 (Eh) の変化については大きな変化は認められなかった。pH の変化もほとんどなかった。

六価クロム (Cr(VI)) の変化を図 2 に示す。乾湿繰り返しにより、六価クロムの溶出が促進されていることが明らかとなった。10 回目以降では、環境基準 (0.05mg/L) の 200 倍を越す濃度に達した。純水と雨水について差は認められなかった。

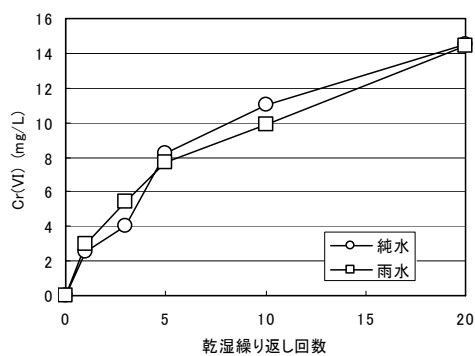


図 2 六価クロム濃度の変化

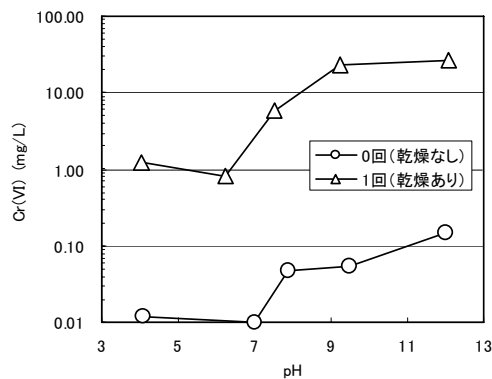


図 3 pH 依存性試験（六価クロム）

土壌含有量試験では、六価クロムは定量下限以下であった試料が、1回の乾燥湿潤により、高い値を示したことから、また、1M塩酸の場合T-Crは減少しているにもかかわらず、Cr(VI)が増加することから、Cr(III)からCr(VI)への酸化の可能性が高いと考えられる。

pH依存性試験では、乾湿繰り返し0回と1回の試料について試験した。乾燥により試験した全pH領域で濃度上昇が認められた。また、乾燥なし(0回)でも、アルカリ性になるほど溶出濃度が上昇することが確認された(図3参照)。

2-3-4 まとめ

再生埋め戻し材を用いた乾湿繰り返し試験では、溶出試験の六価クロム濃度が繰り返し回数の増加に伴って上昇した。土壌含有量試験(環告19号)結果より、クロムの酸化促進の可能性が認められた。一連の検討より、土壤環境基準にて問題を生じない製品であっても、再生製品の利用環境により変化が生じる可能性があり、利用形態を模擬できる様々な試験系による評価が必要と考えられる。

2-4 再生製品環境安全評価試験データの蓄積

2-4-1 研究目的

これまで、再生製品環境安全性評価について、試験法の学会規格化等への取り組みを行ってきた。全国35道府県においてリサイクル製品認定制度が実施されているが、認定時に土壤環境基準についての調査は実施されている。これらのリサイクル製品に関して、各種特性化試験を実施し、環境安全評価試験のデータを収集し、将来的にはデータベース化を目指す必要がある。今回は、リサイクル製品認定制度で認定されている製品等について、幅広く特性化試験を実施し、データの蓄積を行なった。

2-4-2 研究方法

1) 特性化試験

今年度の試験データを蓄積するために以下の試験を実施した。全含有量、蛍光X線含有量、土壌含有量試験、土壌溶出試験、JIS有姿攪拌試験(JIS K0058)、環境最大溶出可能量試験、シリアルバッチ試験、pH依存性試験

2) 試料

35道府県のリサイクル認定制度担当部局に対し、認定製品試料として提供可能な製品をメールにて問い合わせ、リスト(約100品目)を作成した。このリスト中より、一般的に土木資材として利用されているリサイクル認定製品および骨材原料の提供依頼を行なった。主に、産廃スラグアスファルト混合物、産廃スラグコンクリート製品、一廃スラグコンクリート製品、建設汚泥再生処理土、スラグ利用再生路盤材、再生砕石、高炉スラグ舗装補修材などを選択した。15製品および製品製造に用いた再生材料について、各種特性化試験を行なった。

2-4-3 結果及び考察

29種の製品および材料を用いて、各種特性化試験を実施した。製品および材料について、

例えば大きく土壌環境基準（環告 46 号）を超過するようなデータは得られていない。

JIS 有姿攪拌試験（K0058）について、pH は中性域のものから pH13 まで達する試料も存在した。金属類については、Pb, Cd, As, Se (ICP 発光分析)については、定量下限以下となっている。また、Cu, T-Cr, Zn については、ごく微量検出される製品が存在した。

環境最大溶出量可能量試験において、一部の原材料スラグで Pb, Zn が検出されたが、ほとんどの製品では、重金属類は定量下限以下となった。

2-4-4 まとめ

今年度、各種の土木資材系のリサイクル製品について、現状実施準備ができていない試験群によりデータ収集を行った。各種リサイクル製品の特性を評価できるデータが収集された。現段階では、複数の類似製品のデータ収集が行われていない。データを増やし、解析を進め、新規リサイクル製品等に利用できるデータベースを構築することを目指す必要がある。

3. 土壌・地下水系への環境影響評価モデルに関する研究

3-1 発生源モデルへの Geochemical model の適用性の検討

3-1-1 研究目的

再生製品の安全性評価においては、溶出試験等の一連の試験群によってある評価基準を充足するか否かによって判断する方法が一つの現実的な手法である。しかしながら、実利用場における多様な条件のすべてを試験によって評価するには限界がある。Geochemical モデルの利用は、材料の基礎的な特性を基に、降雨条件、溶媒条件等を変化させることで多様な利用場を想定した予測、あるいは長期の予測を可能とするものであり、安全性評価を支援する一手法として位置付けられる。但し、その適用に際し、必要とする入力情報の入手可能性、考慮すべき現象等、結果の妥当性に影響を与える要素は多く、信頼しうる予測結果を得るために検討すべき課題は多い。本研究では、再生材の安全性評価において Geochemical モデルを援用するために、次の 3 つの検討を実施した。①既存の Geochemical モデルの現状の開発状況を把握すると共に、それぞれの計算手法について調査し、独自のモデル開発の可能性について検討する。②Geochemical モデルの適用性を検討するために数種の試料を対象に安全性評価で採用される各種試験を実施し、既存モデルを用いて pH 依存試験の再現を試みる。また、モデルの適用が有効であると考えられている現象、特に再生材の安全性評価において既存の試験系では考慮されていない外的因子（環境因子）の溶出挙動における影響を確認する。③既存の試験群の結果に基づいて Geochemical モデルの入力情報を作成する手法を検討し、想定利用場における発生源モデルの作成を試みる。

3-1-2 研究方法

①既存の Geochemical モデルとして MINTEQA2, PHREEQC, ORCHESTRA を対象に解法や計算の流れ、特徴を整理した。また、独自モデル作成は、既存研究における焼却灰のアベイラビリティ値を溶出に關与する各元素の初期量として与えたコンパートメントを単一要素とし、

それを鉛直に連結した一次元場 (H=10m) として作成し、炭酸平衡した降水を与えた。計算は、溶解平衡、解離平衡、錯体生成を考慮し、イオンバランスから pH を決定する方法を採用した。

②試料として、ASR スラグ、銅スラグ、焼却灰、鉛汚染土壌を用い、基礎特性として金属含有量、アベイラビリティ試験、pH 依存試験を実施した。また、外的な環境因子が重金属溶出に与える影響を確認するために、a)イオン強度、b)DOC、c)酸化還元電位を変化させたバッチ溶出試験を実施すると共に、各溶媒において溶出に關与する化学形態を逐次抽出により特定する事を試みた。実験により得られたアベイラビリティ値と陰イオンデータを入力情報として Phreeqc により pH 依存試験を再現することを試みた。

③既存の Geochemical モデルにおいて固体からの溶出現象を再現するためには、固相中元素の存在形態 (化学種) と量が必要であることから、既往の試験群から得られる液相濃度情報から Geochemical モデルの入力情報となる固相中化学種とその量を決定し、その結果を利用して①と同様の一次元利用場 (H=10m) における溶出挙動を模擬した。

3-1-3 結果と考察

①MINTEQA2, PHREEQC, ORCHESTRA のいずれも、系内の化学種とその量を初期情報として与え、種々の平衡計算から各相中の化学種の分配を行うという計算手法は共通していた。但し、実利用場における溶出現象に関しては、再生材は固体として存在しており、そこに各種溶媒が流入する。したがって、系内の初期量として必要となるのは、固相中化学種とその量となる。再生材や廃棄物を対象とする場合、従来の特性化試験群において固相中の化学種を決定すること

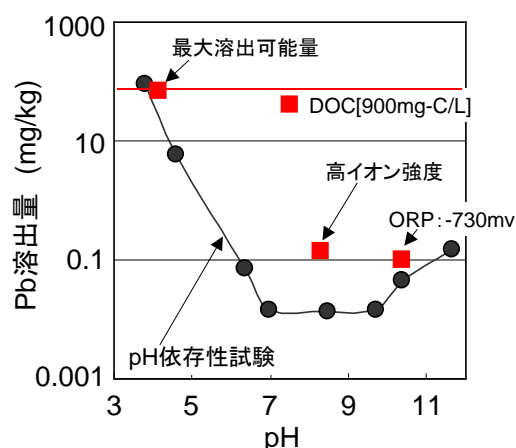


図4 各溶媒条件での Pb 溶出 (ASR スラグ)

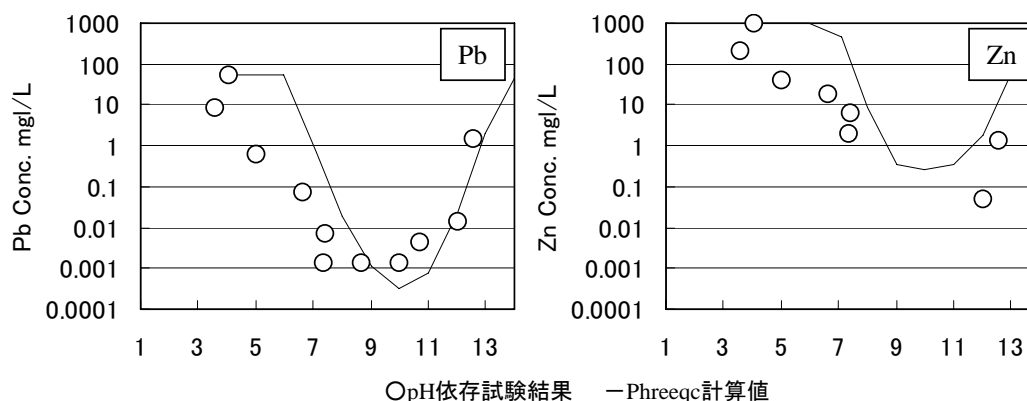


図5 Phreeqc による pH 依存試験の再現 (ASR スラグ)

は一般的でないことから、Geochemical モデルを利用する上では、試験から得られる液相濃度情報から固相中の化学種を予測することが必要となる。一方、独自に作成した一次元モデルによる予測計算結果は、設定する錯体生成定数によって極端に高い Pb 濃度（最大 1000mg/L）が得られる等、改善すべき点が多く、以降においては既存モデル（Phreeqc）を利用することとした。

②実験の結果、各外的因子を変化させることによって溶出が促進されることが確認された（図 4）。特に DOC の影響は顕著であり、スラグにおいて Cu, Zn, Pb 等が中性域の pH においてもアベイラビリティに相当する量で溶出した。DOC により溶出が促進した成分は、逐次抽出での確認の結果、イオン交換態に相当する量であった。Phreeqc を用いた pH 依存試験の再現に関して Pb と Zn の結果を図 5 に示すが、スラグ等においては、アベイラビリティデータを基にした化学平衡計算によって、特定の重金属に関しては溶出の pH 依存傾向を概ね再現できることを確認した。

③上記 pH 依存試験の再現計算では、溶出に關与する量をアベイラビリティ値とし、各陰イオンを pH 依存試験の各 pH 段階で定量した量として与えた。また、各 pH は NaOH 添加によって 4~14 まで調整し、液相存在量及び各段階で固相に沈殿する量を求めた。同様の手法により、各 pH において生成する固相沈殿の形態と生成量を求め、その最大量が固相中化学種としての存在量であるとした。ASR スラグにおいては、過飽和となる固相化学種は 79 種探索され、それらが共存しうるとした条件での平衡計算により、最終的に 13 種の固相化学種とその存在量を決定した。

求められた化学種を固相存在量の初期量として、流入溶媒として海水を与えた場合（流速 10^{-5}cm/s ）の一次元場（ $H=10\text{m}$ ）における深度方向の Pb の経時的な濃度変化を例として図 6 に示した。上部からの海水の流入によって pH は経年的に低下し 9 前後に収束する。一方、Pb 濃度、Zn 濃度は、溶媒中の Cl により塩化物錯体を形成して溶出が促進し、上部より濃度上昇が起こっている。極めて遅い流速を仮定した計算であるため、溶出濃度の上昇した

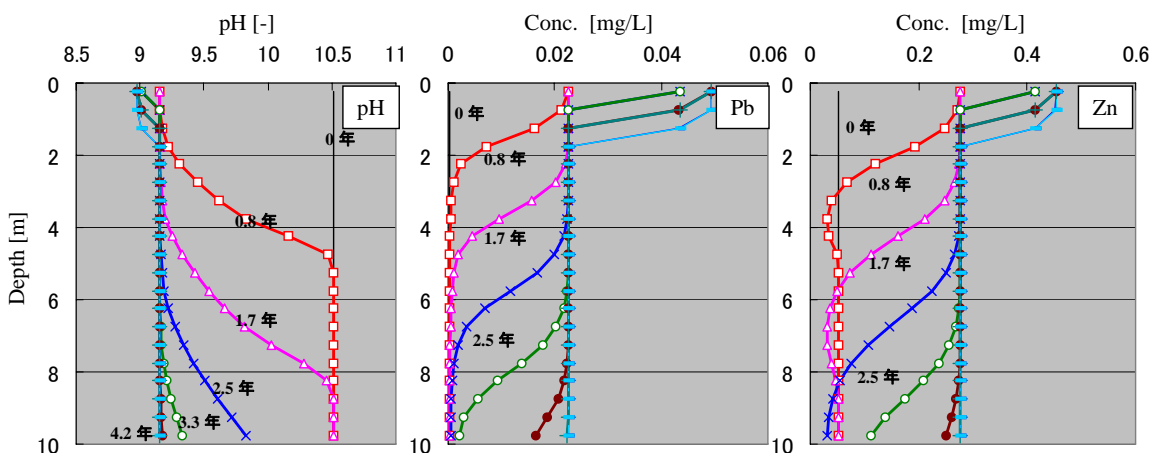


図 6 アベイラビリティ試験と pH 依存試験から決定した固相化学種を用いた 1 次元場の濃度分布（溶媒：海水，材料：ASR スラグ，流入流速 10^{-5}cm/s ）

最上部でも、設定した固相化学種の 0.2%程度が 7 年程度の計算期間で溶脱する結果となった。同様の計算を炭酸平衡した雨水についても計算したが、①で実施した独自モデルと比較しても濃度的に現実的な値を得ることができてた。1 次元カラム実験の結果等によって結果の検証、および表面吸着や DOC 等との錯体形成等の現象の考慮がさらに必要であると考えられるが、本研究で提案する計算手法により、アベイラビリティ試験と pH 依存試験から得られる液相中濃度情報から、利用場を想定した計算は可能であると思われる。

3-1-4 まとめ

再生材の安全性評価において、評価試験群を支援するための Geochemical モデルを用いた発生源モデルについて検討を実施した。既存の Geochemical モデルにより再生材からの溶出現象を表現するためには、固相化学種の種類と量が不可欠な情報となるが、アベイラビリティ試験と pH 依存試験から得られる液相濃度情報を基に、固相化学種の推定ができる可能性があること、また、固相化学種を決定できれば、利用場を想定した発生源からの溶出挙動予測は比較的容易に達成可能であることを示した。一方、実験的な検討により、溶媒の変化、環境条件の変化等が再生材からの重金属の溶出に与える影響は大きいことが確認され、Geochemical モデルによる予測の本質的な意義はこうした広範な条件変化（シナリオ）を仮定した検討を実現する事にあることから、より多様な条件下で起こりうる現象（例：DOC による錯体形成等）に対応可能な手法を構築することが今後の課題として必要である。

3-2 環境安全評価試験データに基づく環境影響評価モデルの構築

3-2-1 濃度境界条件設定へ向けた溶出試験結果の適用性に関する検討

(1) 研究目的 通常の移流分散解析では、境界条件として濃度固定、フラックス固定条件しかない。時間変化を既知量として与えれば時間毎の濃度やフラックスの変化も表現することが可能であるが、流れ場の影響によって変化する濃度境界条件を表現することはできない。溶出試験結果を用いて環境影響評価を行う場合、それぞれの溶出試験の特性を理解し、その特性に合致した境界条件を与える必要がある。そこで、バッチ溶出試験とカラム溶出試験結果の溶出機構の違いについて固相周辺に存在する境膜の存在を考慮した評価モデルの開発を行った。

(2) 研究方法 境膜の厚みは間隙内実流速によって変化することが知られており、流速が大きくなれば境膜は薄くなり、逆に、小さくなれば厚くなる特性を有している。振とう式バッチ試験では間隙内実流速は無限大に近くなるので、境膜厚さはゼロとみなすことができる。カラム試験では溶出試験時の流速に合わせて境膜厚さを計算できる。バッチ試験では、拡散溶出した溶質が振とうによって間隙水全体に瞬時に広がって濃度が均一になる、という減少が繰り返されているとして時間ステップを 1/2 に区切って、最初の 1/2 が一次元拡散溶出、次の 1/2 ステップが振とうによる濃度の均一化というモデルを構築した。カラム試験では、流速に依存した境膜厚さを計算し、境膜内は不動水として一次元拡

散減少、可動水領域は二次元移流分散減少として計算するモデルをつくって計算を行った。

(3) 研究結果 バッチ溶出試験を模擬した計算結果より、液固比が増加するほど濃度は減少し、溶出している質量は増加する傾向が計算された。また、土粒子が小さくなるほど溶出濃度が高くなる傾向も計算され、実際の溶出減少に即した計算結果を得ることができた。次に、

カラム溶出試験を模擬した計算結果では、動水勾配が大きくなるにつれて、カラムから流出する液相の濃度は減少する傾向が計算され、実験結果に合致した結果を得ることができた。また、動水勾配とカラム長さの積が同じであれば、異なるカラム長で溶出試験を実施したとしても同様の溶出挙動となることも示された。バッチ試験とカラム試験結果を比較するため、両者の液固比毎の液相濃度についてまとめた図を示す。液固比の L/S が 10 のときは、カラム試験結果とバッチ試験結果に大きな違いがみられるが、液固比が大きくなるにつれて、その差異が減少する傾向にあることが計算された。より精密な溶出試験を実施し、計算結果と比較することで、バッチ試験結果からカラム試験結果を予測可能となり、流速の違いによる溶出挙動を表現可能となることで、より現実場に近い表現が可能になるものと思われる。

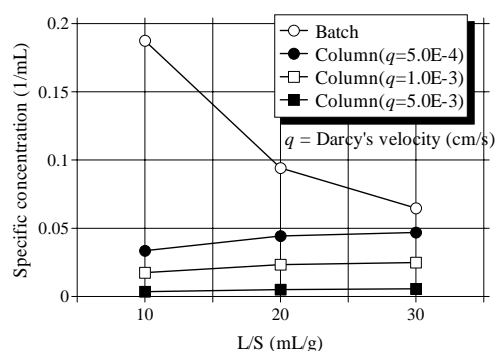


図7 バッチとカラム溶出試験を模擬した溶出濃度計算結果の比較

3-2-2 環境安全評価試験データに基づく環境影響評価モデルの構築

(1) 研究目的 再生製品を環境中で安全に有効利用していくために、その合理的な評価方法の提案が待たれている。その方法として、再生製品の利用シナリオに基づいて必要となる物理試験や環境安全評価試験を実施して物理パラメータや溶出パラメータを取得し、移流拡散モデルを用いて評価地点 (Point Of Compliance, POC) における地下水濃度を評価する手法を構築することを目的とする。移流拡散モデルでは発生源の濃度境界条件として濃度固定条件を置く場合が多いが、本研究では、主にシリアルバッチ試験と最大溶出可能量試験のデータを用いるモデルの試作を行った。

(2) 評価モデルの開発 物質放出挙動モデルは 3 次元移流拡散解析ソフトウェア G-TRAN3D の濃度境界条件部分について、内部拡散や溶解などによる放出速度変化を表現する式を組み込むこととした。シリアルバッチ試験の結果から各面分のフラックスを計算し、放出速度パラメータを決定する方法を提案した。さらに、周辺地盤との透水性の違いから、透水係数が周辺地盤の 1/100 以上の物体を「透水体」、1/100 未満の物体を「不透水体」とし、透水体は、他の地盤と同様に体積 (間隙、透水係数等) を持つ要素として置き、不透水体は透水性を持たない境界面として設定する方法を開発した。

(3) 再生製品を用いた評価結果

利用シナリオとして路盤材，アスファルト合材，コンクリート二次製品のケースについて，それぞれ利用場を設定し，銅スラグの単体試料，アスファルト試験体，コンクリート試験体それぞれについてシリアルバッチ試験，環境最大溶出可能量試験，ならびに各種物理試験を適用してパラメータを取得し，移流拡散解析を適用した。その結果，全シナリオに共通の挙動として，汚染物質は不飽和帯をほぼ鉛直下方に移動し，地下水面に達した後は地下水下流方向に拡散移動し，再生製品直下の地下水水面 POC 到達に数年程度，下流側 20m の POC 到達には 10 から 30 年程度を要すること，その間，再生製品からの累積溶出量は潤渇に到達せず，ほぼ最高濃度のまま溶出が継続することなどが示された。なお，放出後の挙動は地盤パラメータに大きく影響されるため，適切な地盤パラメータの設定が必要である。

4. 安全品質レベルと他の環境負荷とのトレードオフに関する研究

4-1 溶融スラグを対象とした環境負荷評価

4-1-1 研究目的

都市ごみ焼却残渣の有効利用は喫緊の重要課題である。日本では，より高いレベルの安全性を確保するために溶融スラグ化が普及しているが，一方でエネルギーを多く消費するプロセスであり，安全性と他の環境負荷とのトレードオフを踏まえて合理的に安全品質を設定していかなければならない。そこで，ライフサイクルアセスメントの手法を用いて，溶融スラグ化の環境負荷を算定した。

4-1-2 研究方法

現状の焼却・残渣埋立に対して，灰溶融及びガス化溶融による溶融スラグ化利用（方式別，溶融飛灰の山元還元の有無）におけるエネルギー消費，温室効果ガス排出量，最終処分量についてライフサイクルアセスメントの手法により評価した。機能単位は，建設資材 1 トン及び溶融スラグ 1 トンの製造を機能単位とした。焼却に伴う発電や溶融飛灰の山元還元による回避効果も考慮した。プロセスにおける投入・産出データを取得し，温室効果ガスの発生原単位を乗じ積み上げることで評価した。

4-1-3 結果及び考察

焼却・埋立に比較して溶融スラグ化はいずれの方式でも二酸化炭素排出量は増加した。溶融飛灰の山元還元を考慮しても，回避分は極めて小さかった。欧州では隔離下で焼却灰を直接的に利用しているが，日本では溶融スラグ化によって安全品質を高める代償として温室効果ガスの排出量が増加している。このトレードオフの関係をどのように理解していくかが今後の課題である。

4-1-4 まとめ

単純な焼却・埋立に対して，溶融スラグ化は正味の温室効果ガス排出量は多くなるというトレードオフの関係が存在する。安全品質を高めることとのバランスを考慮する必要がある。

4-2 道府県リサイクル製品認定制度認定製品を対象とした環境負荷評価

4-2-1 研究目的

リサイクル製品のライフサイクルアセスメントを活用した環境負荷の評価のために、製造事業者や行政の認定担当者が簡単に利用可能なツールを作成する。そのために、リサイクル認定製品製造事業者に対するアンケート調査結果を基に、各リサイクル認定製品の環境負荷量の算定を行う。

4-2-2 研究方法

全国のリサイクル認定製品を対象とし、2008年1月から2月にかけて富山県内の製造事業者に対して、また2008年3月に全国の製造事業者に対してアンケート票を送付し、回答を郵送回収する方法で調査を行った。

4-2-3 結果及び考察

様々なリサイクル製品の中で、以下では一般廃棄物溶融スラグ配合アスファルト混合物についての解析結果を例として報告する。

(1) 環境負荷の評価範囲

リサイクル製品と通常製品は、製造工程以降の工程は同じであるとした。溶融スラグは、製造時のエネルギーは対象とせず、細骨材として利用するために必要な摩砕などの工程から対象とした。溶融スラグが代替する天然原料の削減分についても評価した。通常製品では、発生している溶融スラグについては埋立て処分されるとし、処分場までの移動、埋立て処分について評価した。

(2) 調査結果

溶融スラグは細骨材である砂を代替しており、配合率は5%~10%であった。リサイクル製品製造の際に現有施設のままで製造可能との回答もあったが、多くの事業者では溶融スラグの保管施設の増築や既存設備の改良が必要であったと回答した。品質や製造時の不良品発生率等については、ほとんどの事業者が既存の製品と同じとの回答であった。

(3) 解析結果

溶融スラグ配合アスファルト混合物の1トン当たりの二酸化炭素排出量の比較を図8に示す。二酸化炭素の発生量のうち、ユーティリティによるものが多くを占めていることがわかる。この原因は、製造工程として骨材の乾燥があるためである。表*に詳細な各工程における二酸化炭素排出量を示す。原材料は、溶融スラグが砂を代替するため、わずかに減少している。原料の輸送は、砂は事業所の近くより購入されているが溶融スラグは遠いため排出量が増えている。溶融スラグを配合したアスファルト混合物では、製品を1トン製造することにより、3.12kgの二酸化炭素を削減することが可能であることが明らかとなった。

4-2-4 まとめ

リサイクル認定製品を製造する事業者を対象にアンケート調査を行い、各品目について環境負荷に関する算定を行った。リサイクル製品を1トン製造することにより、例として溶

融スラグ配合アスファルト混合物は3.12kg，融スラグ配合コンクリート二次製品は1.72kg，フライアッシュ配合コンクリート二次製品は48.35kgの二酸化炭素の排出を削減できることなど，各品目の二酸化炭素削減量を算定し示した。特に融スラグアスファルト製品については詳細な解析の過程を含めて紹介した。

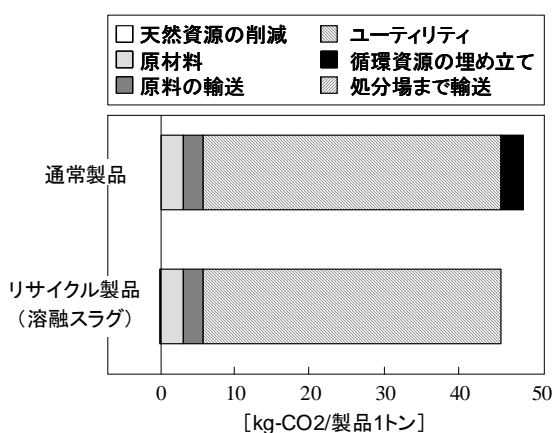


図8 二酸化炭素排出量の比較

表1 各工程における二酸化炭素排出量

	[kg-CO ₂ /製品1トン]	
	リサイクル製品	通常製品
原材料	2.96	3.07
原料の輸送	2.94	2.78
ユーティリティ	39.84	39.84
循環資源の埋め立て	0	2.87
処分場までの輸送	0	0.16
天然資源の削減	0.14	0
合計	45.60	48.72

5. 結論

建設系再生製品は，環境安全性の担保の下でリサイクルが促進されるべきである。そこで本研究では，環境安全評価の枠組みを提示し，その中での環境影響評価手法として，土壤地下水への影響を合理的に評価するための各種の溶出試験方法を開発，確立し，廃棄物学会のアカデミックスタンダードとして規格化を行った。また，それらの溶出試験によって得られた再生製品の特性化情報を用いて，利用条件に応じた環境影響評価の予測モデルを開発し，非鉄スラグの利用ケースへの適用によりその有効性を確認した。さらに，最終的に環境安全性の品質を合理的に判断するにあたって必要となる情報として，他の環境負荷として温室効果ガス排出とのトレードオフの関係性をライフサイクルアセスメントの手法を用いて提供した。

英語概要

・研究課題名=Studies on Methodology to Set Environmental Safety Quality Level based on Standardization of the Testing System for Secondary Recycled Products

・研究代表者名及び所属=Masahiro Osako (National Institute for Environmental Studies)

- 共同研究者名及び所属=Akiko Kida (National Institute for Environmental Studies), Kazuto Endo (National Institute for Environmental Studies), Hirofumi Sakanakura (National Institute for Environmental Studies), Shin-ichi Sakai (Kyoto University), Yasumasa Tojo (Hokkaido University), Kentaro Miyawaki (Meisei University), Shogo Sakita (Hiroshima Prefectural University), Hiromi Sakamoto (Kanagawa Prefectural Environmental Science Research Centre), Takao Tanosaki (Taiheiyo Cement Corporation)
- 要旨 (200 語以内) =Recycling of secondary products for construction use should be further promoted under secure of environmental safety. This research, first, proposed an evaluation framework for secondary recycled products in environmental safety management. In the framework, several characterization leaching tests were developed and established to logically evaluate environmental impact against soil/groundwater. Academic standardization for them is just carrying out in Japan Society of Waste Management Experts. Moreover a simulation model to predict the environmental impact reflecting the utilization condition as well as the characterization of the product was developed. Effectiveness of the model was confirmed applying to the actual product. Finally trade-off relationship between the environmental safety and the other environmental load such as green gas emission was analyzed using a life-cycle assessment methodology and the result as basic information can be offered to reasonably judge acceptable level of the environmental safety.
- キーワード (5 語以内) =secondary recycled product, utilization, leaching test, standardization, environmental safety quality level