

廃棄物処理等科学研究費補助金研究報告書概要版

研究課題名・研究番号=都市ごみ埋立処分における量の大幅削減と質の適正化戦略に関する研究

研究期間(西暦)=2003-2004

代表研究者名=東條安匡(北海道大学)

共同研究者名=田中信寿(北海道大学)

研究目的=我が国では、循環型社会推進基本計画(2003)において2010年までに埋立量の半減という目標が、また、経済財政諮問会議・循環型社会に関する専門調査会では、2050年迄に10分の1という目標も掲げられている。一方、EU各国でも近年、埋立処分される廃棄物の質的な規制が進められているところであり、埋立処分される廃棄物の量的削減、質の適正化は世界各国での重要な共通課題である。それらの目標に向けて実際に我々は何を削減し、何を管理すべきなのか、その具体的な戦略を定めるためには、現状における埋立物の量的・質的把握と管理・制御可能な埋立物の抽出が不可欠である。これまで、焼却残渣、破碎残渣など個別の埋立物の溶出挙動や環境負荷についての研究は多くなされてきているが、埋立地に投入される全てのINPUTを捉え、各廃棄物の寄与を明確化した研究はない。自治体処分場での一般廃棄物埋立物は、その自治体の中間処理施設整備状況に依存する傾向にあり、所有する施設にて対応できない廃棄物は直接埋立処分される傾向にあるが、その実態、及びそれらが有する有機物・重金属負荷に関する定量的データは極めて少ない。そこで、本研究では複数の処分場において、埋立物の全てを対象として、量、質の把握を行うと共に、各廃棄物の有する有機物負荷、重金属負荷への寄与を明確にする事を目的とした。

研究方法=本研究は以下の手順で実施した。

- (1)まず、調査対象とする処分場を、処理施設の整備状況と埋立物の種類から以下の通り3つ選択した。
[A町処分場]可燃ごみ:焼却,不燃・粗大ごみ:破碎選別,資源ごみ:選別を行っている。埋立物は、焼却残渣,破碎残渣,破碎不適物,大型ごみ,直接搬入物の5種である。剪断破碎机を有しないため大型の粗大ごみが直接埋立処分される。
[B市処分場]可燃ごみ:焼却,不燃ごみ:破碎と直接埋立,粗大ごみ:破碎,資源ごみ(容器包装廃棄物,事業系木材):選別,チップ化,RDF化等の処理を行っている。埋立地搬入物の分類は、焼却灰,飛灰,破碎残渣,資源化残渣(RDF,チップ化,選別施設から),不燃ごみ,直接搬入物である。事業系廃棄物,建設廃棄物の直接搬入が多いことが特徴である。
[C組合処分場]可燃ごみ:焼却,不燃ごみ・粗大ごみ:破碎選別,埋立地搬入物は、焼却灰,飛灰,破碎残渣,プラスチック固化物である。埋立地物はすべて中間処理残渣で直接埋立物がないことが特徴である。
- (2)埋立物の量:処分場を管理する各自治体から、平成13,14年度の埋立物毎の搬入データを入手。
- (3)埋立物の組成調査:中間処理残渣(焼却灰,飛灰,破碎残渣,資源化残渣など)については各処分場にてそれぞれ10~30kgをサンプリングし、破碎残渣、資源化残渣は縮分後、組成分けした。組成分けが困難な焼却灰,飛灰,プラスチック固化物はそれ自体を組成項目の一つとした。直接埋立ごみについては、人手により組成分析が可能な場合には人手により埋立物を組成項目毎に計量した(組成分析重量:A町7.6トン,B市:約300kg)。この時、多様な素材から構成される家具,家電製品などは、現場で解体し組成毎に分類して計量した。搬入量が多く人手による組成調査が困難であったB市の直接持込ごみ(事業系直接搬入,建設廃棄物)については大型の廃棄物が多く人手による組成分けが困難だったため視認調査により組成を推定した(調査台数61台分140トン)。
- (4)有機物負荷の調査:各処分場で組成分析時に採取した各組成毎のサンプルを乾燥し含水率を求めた後、熱灼減量を測定した。組成別のILを各処分場での搬入物組成割合に乘じ、各埋立物の有機物負荷を算出した。
- (5)重金属負荷の調査:各処分場で採取した組成別の試料を、乾燥・熱灼した後、灰化したサンプルを王水分解(一部フッ酸分解)し検液を作成し、原子吸光度法を用いて金属含有量を測定した。各組成別の有機物含有量を各処分場での搬入物組成割合に乘じ、各埋立物の重金属負荷を推定した。分析対象とした元素は、Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn, Sb, Se, As, Biの16元素である。

結果と考察=以下に(1)埋立地搬入物の量と物理組成,(2)有機物負荷,(3)重金属負荷について個別に記述する。

- (1)搬入物の量と物理組成:[A町処分場]量的割合は乾ベースで焼却残渣32%,破碎残渣15%,処理困難物20%,大型ごみ25%,直接搬入8.3%であり、直接埋立物が52.7%を占めた。物理組成は焼却残渣が32%,木くず25%,金属類9%,硬質プラスチック9%,石・コンクリート類7.3%が主要な組成であった。[B市処分場]焼却灰17%,飛灰2.7%,破碎残渣1.4%,資源選別残渣4.7%,不燃ごみ12.5%,直接搬入61.7%であり、直接搬入が全体の6割を占めた。同様に直接埋立される不燃ごみと合わせると直接埋立物は74.2%となる。組成別では、焼却灰と飛灰19.7%,木くず18.7%,金属類7.7%,コンクリート・瓦礫類18.8%,プラスチック類14.1%,ガラス類11.6%で、直接搬入の建設廃材に由来する木くず,瓦礫類が多い。[C組合処分場]焼却灰50%,飛灰23.9%,破碎残渣4.1%,プラスチック固化物4.1%であり、焼却残渣が全体の74%を占めた。焼却残渣以外の搬入物の組成は、プラスチック類6%,木くず5%,金属2%,その他12%であった。
- (2)有機物負荷:各組成の熱灼減量測定値を搬入物組成割合に乘じて全有機物負荷を算出した結果、年間全有機物投入量/全埋立量はA町処分場で42%,B市処分場で38%,C組合処分場で21%となった。A,B処分場での有機物負荷の由来は直接埋立物中の木くず,プラスチックの寄与が特に大きかった。また、A処分場では、破碎残渣中の有機物の寄与も24%程

あった。C 組合では中間処理残渣のみであるにもかかわらず 21%の有機物負荷となった理由は、破碎残渣中の有機物の寄与が大きいためである（破碎残渣の寄与率 65%）。

(3)重金属負荷：各組成の金属含有量を搬入物組成割合に乗じて金属負荷量を算出した結果、特に埋立負荷量の多かった金属は A, B, C 処分場の順に年間埋立量として Fe(109, 16852, 111t/年), Al (39.4, 4193, 107 t/年), Cu (6.9, 925, 3.5 t/年), Zn(1.5, 288.7, 12.5 t/年), Pb(0.2, 66.6, 2.5 t/年), Sb(0.2, 71.4, 0.8 t/年)であった（各処分場の年間総埋立量は A,B,C の順に約 1500t, 約 23 万 t, 約 5000t）である。金属資源としてだけでなく有害性の観点からも大量の金属が処分場に搬入されていることがわかる。次に、この年間金属埋立量を総埋立量で除して、埋立物全体としての金属濃度を算出し、地殻の金属含有量であるクラーク数と比較した。その結果、Ca, Fe, Al, Na, Mg, K についてはクラーク数とほぼ等しいか若干低い濃度となったが Zn, Cu, Pb, Cd, Se はクラーク数に対して約 1 桁～2 桁高い濃度となった。さらに Sb については 1000 倍程度の乖離が認められた。土壌との乖離の傾向は有機物等の搬入量の多い A, B 処分場よりも中間処理残渣のみの埋立物である C 処分場で大きい傾向にあった。これは、A, B では他の搬入物により濃度的に希釈されるが、C では中間処理によって金属が濃縮されている結果である。

結論=埋立処分場の現状の埋立物の量的削減可能性、質的適正化の可能性を把握するために 3 処分場の埋立搬入物の組成、有機物負荷、重金属含有量の実態調査を実施した。その結果、以下の結論を得た。

(1)搬入物の量と組成：直接埋立物を受け入れている 2 処分場ではその割合が全埋立量の 50%～74%と大きく、組成として木、プラスチックを多く含む傾向にあった。直接搬入物から木、プラスチックを前処理施設等により排除し、熱処理や資源化等を行うことで埋立物の約 35%程度を削減できる可能性がある。

(2)有機物負荷：直接搬入物中の木くず、プラスチックが埋立物の有機物負荷（埋立物全体の熱灼減量約 40%）を大きくする要因となっていた。現状では、例えばドイツの埋立物規制(2002)の熱灼減量 5%以下という値に比較すると直接搬入される廃棄物の質的検討が必要である。一方、直接埋立物の無い C 処分場であっても破碎選別残渣由来の有機物により全有機物負荷は 20%を越えた。有機物の埋立地投入負荷を削減するためには破碎選別精度の向上が不可欠である。

(3)重金属負荷：中間処理を介しても埋立地への金属投入負荷（金属埋立量 / 廃棄物総排出量）に大きな差は認められなかった。調査対象とした 3 処分場とも、各搬入物から Fe, Al を筆頭に、有害金属である Pb, Cd, Sb 等の大量の搬入が認められた。後者については埋立物の金属濃度（金属埋立量 / 全埋立量）が土壌の含有量の 1～2 桁高く、中間処理残渣が多いほど濃度は高くなる傾向にあった。閉鎖後の埋立地を土地として評価する場合、これらの金属は問題となる可能性がある。

現状における問題点と課題：本年度の研究では埋立物の実体調査と制御すべき廃棄物の抽出のみを行い、戦略の検討には至らなかった。

研究課題名・研究番号 = コンクリート解体微粉の地盤材料としての品質保証に関する研究

研究期間 = 2003-2004

代表研究者名 = 黒田泰弘 (清水建設)

共同研究者名 = 内山 伸 (清水建設)

研究目的 = 都市部では、高度経済成長期の建設された建造物の更新による廃コンクリートの増大に対し、現状の路盤材への再利用は限界に達しており、資源である骨材の有効利用の観点からもコンクリート分野での骨材リサイクル技術の確立が急務である。近年、再生骨材の製造技術の開発が進み、構造用コンクリートへ適用できる高品質再生骨材の製造が可能となった。しかし、その普及展開には、付着セメント分を除去する過程で発生する多量のコンクリート解体微粉（以降、微粉末と略記）の有効利用技術の確立が不可欠である。

筆者らは高品質再生骨材の製造技術の一つである加熱すりもみ法で得た微粉末が高い粉末度と弱い自硬性を有することに着目し、地盤材料としての適用を進めているが、今後の展開において有価物化は必須の条件と考えられる。微粉末を有価物として売買するには相応の品質とその保証ができなければならず、微粉末の固化性能を明らかとし、環境安全性を保証することが求められる。したがって、微粉末の再水和メカニズムの解明と土壌環境への六価クロムの溶出特性の把握は重要な研究課題であり、本研究の主目的とした。

研究方法 = 1. 微粉末の再水和メカニズムおよび六価クロムの溶出特性の検討

骨材を含まない硬化セメントペーストを破砕し、炭酸化（大気中の二酸化炭素によるコンクリートの経年変化を想定）や加熱処理温度を変え、加熱処理温度の違いや炭酸化の有無が、セメント水和物の分解やクリンカー鉱物の再合成に与える影響について検討した。また、破砕片を粉砕して微粉末を製造し、微粉末スラリーを練り混ぜ、スラリー硬化体の固化強度を測定するとともに、再水和物の化学分析を行い、微粉末の再水和メカニズムについて検討した。さらに、中性化（炭酸化）が進んでいる経年コンクリートを用い、加熱処理温度を変え、コンクリート微粉末を製造し、その再水和についても検討した。

また、環境安全性に関しては、加熱処理や炭酸化処理を行った硬化セメントペーストから得た微粉末および微粉末スラリーの硬化体に関して、六価クロム溶出量の検討を行うとともに、再資源化施設から入手した再生砕石（破砕コンクリート塊）に含まれるコンクリート微粉末からの六価クロム溶出特性についての検討を行った。

2. 微粉末を用いた改良土の固化強度と六価クロムの溶出の検討

地盤改良工法（浅層地盤改良と深層地盤改良）への微粉末利用を模擬した室内配合試験を行った。試験では、対象土の種類（砂、砂質土、シルト、ローム、粘土）、セメントの種類（普通ポルトランドセメント：OPC、高炉セメント B 種：BB、セメント系固化材：HK）、微粉末とセメントの配合量を変化させた。微粉末とセメントの配合量は、浅層地盤改良で 100～150kg/m³、深層地盤改良で 250kg/m³ とし、微粉末とセメントの比率を変え、土を混合した固化体に対して、六価クロム溶出量、クロム含有量および固化強度を調べ

た。その結果をもとに、地盤改良の用途に応じて強度品質を確保しつつ、土壤環境基準にも適合する微粉末の添加量、適用条件などについて検討した。

結果と考察 = 1 . 微粉末の再水和メカニズムおよび六価クロムの溶出特性

(1) 100 以上の加熱処理微粉末は低いながらも強度発現した。400 以上の加熱処理微粉末にクリンカー鉱物 C_3A の再合成が確認できること、また 400 以下の再水和物においてエトリンガイトの生成を確認できることから、100~400 の加熱処理微粉末は主に脱水したアルミネート相の再水和によって強度発現しているものと考えられる。

(2) 500 以上の加熱処理微粉末は 400 までのものと比較すると、明らかに高い強度発現をした。500 以上の加熱処理微粉末にクリンカー鉱物 C_2S の再合成が確認されたこと、再水和物において C_2S が水和して放出したと考えられる $Ca(OH)_2$ の増加を確認できることから、500~600 の加熱処理微粉末は主に再合成した C_2S の水和によって強度発現しているものと考えられる。

(3) 促進炭酸化を行ない、加熱処理した微粉末は、炭酸化処理を行わないものと比較して高い強度発現をした。C-S-H の一部は炭酸化によって分解し、シリカゲルを生成することから、このシリカゲルが加熱後、低含水シリカゲルとなり、再水和時には $Ca(OH)_2$ とポゾラン反応して、より高い強度を発現したものと推察される。

(4) OPC 試料より BB 試料の方が加熱処理温度にかかわらず全体に強度発現が大きかった。BB 試料は非加熱でもわずかな強度発現があり、未水和スラグの影響が示唆される。

(5) 中性化(炭酸化)が進んでいる経年コンクリートから得た微粉末を製造し、再水和強度を調べた結果、シリカゲルのポゾラン反応によると思われる比較的高い強度発現が確認された。実用レベルでも加熱処理以降の微粉末の吸湿を抑えることで強度発現性能を向上できる可能性が示された。

(6) OPC を用いた加熱処理温度が 500~600 の微粉末でのみ、土壤環境基準 0.05ppm を超える六価クロムの溶出が確認された。加熱処理温度が 400 以上になると、セメント水和物の構造自体の崩壊が始まるため、これ以上高温で加熱されるほど六価クロムの溶出量が増加したと推察される。なお、300 までの加熱であれば、ほとんど影響はないと考えられる。なお、BB 試料からの溶出はほとんど認められなかった。

(7) OPC の再水和物で 500 加熱処理のもののみ土壤環境基準 (0.05ppm) を超え、600 加熱処理のものからの六価クロム溶出は少なかった。500 加熱では、600 加熱ほど C_2S が再合成されていないため、緻密な C-S-H が形成されていないだけでなく、不溶性の無水石膏が多く、AFt 相もほとんど生成していないことが原因として考えられる。

(8) 再生砕石からコンクリート微粉末のみをふるい分け、溶出試験した場合、非加熱であっても六価クロム溶出量が環境基準 0.05ppm を上回るケースがあった。比表面積が大きくなり、セメント付着分も多くなるだけでなく、微粉末自体の炭酸化も進んでいるためと考えられる。

2 . 微粉末を用いた改良土の固化強度と六価クロムの溶出

(1) 浅層改良におけるセメント種類と土質による改良土の固化強度の変化は、セメント種類別では全ての土質で $HK > OPC > BB$ の順になり、土質別では全てのセメントで砂 > 粘土 > シルト > 砂質土 > ロームの順になった。

(2) 材齢 7 日の目標 $q_u=100 \sim 400kN/m^2$ の浅層改良で、強度品質を満足する材料配合の下限値は、ロームを除いて $HK75kg/m^3 + 微粉末 75kg/m^3$ であった。

(3) 深層改良における土質による強度変化は、全てのセメントで砂 > 粘土 > シルト > 砂質土 > ロームの順になった。

(4) 材齢 28 日の目標 $q_u=400 \sim 600\text{kN/m}^2$ の深層改良で、強度品質を満足する材料配合の下限値は、全ての土質で $\text{BB}150\text{kg/m}^3 + \text{微粉末 } 100\text{kg/m}^3$ であった。

(5) セメント量が増加すれば改良土の Cr^{6+} 溶出量も増え、セメント量が同じならば、単体の Cr^{6+} 溶出量が多いセメントを使うほど改良土の Cr^{6+} の溶出量も増加した。

(6) 土壤環境基準 (0.05ppm) を満足する浅層改良の材料配合は、砂では微粉末のみ使用可能で、その量は $100 \sim 300\text{kg/m}^3$ であった。セメントは BB のみを添加可能で、その量は 50kg/m^3 以下であった。砂質土、シルト、粘土では全ての材料および 150kg/m^3 以下の配合を用いることができた。

(7) 深層改良における土質とセメントの種類による Cr^{6+} 溶出量変化は、全てのセメントでローム > 砂 > 砂質土 > シルト > 粘土の順になり、セメントの種類別では、セメント単体の Cr^{6+} 溶出量の傾向と同様に OPC > BB であった。

(8) 深層改良の一般的な固化材量 250kg/m^3 では、固化材に BB あるいは BB と微粉末を使用すれば、いずれの土質でも、土壤環境基準 (0.05ppm) を満足した。

(9) 改良土の構成材料単体の Cr^{6+} 溶出量と乾燥質量比から求めた計算値と測定値を比較した結果、土質とセメントの組合せで以下の関係が認められた。

砂、ローム (全てのセメント) ; (測定値) = $4 \times$ (計算値)

砂質土、シルト、粘土 (OPC) ; (測定値) (計算値)

砂質土、シルト、粘土 (OPC 以外); (測定値) (計算値)

したがって、個々の材料の Cr^{6+} 溶出量と土の物理定数 (湿潤単位体積重量、含水比) から、改良土の Cr^{6+} 溶出量 (上限値) を概ね把握できる可能性が得られた。

(10) ロームおよび砂のセメントによる地盤改良では、セメントと土の硬化反応の過程で、土またはセメントが潜在的に持つ Cr^{3+} で、 $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{6+}$ 反応が喚起されて、 Cr^{6+} 溶出量が増加する可能性が示唆された。なお、ロームに関しては固化強度が低いと、火山灰質粘性土に含有されるアロフェンが影響していることも考えられる。

結論 = 再生骨材製造時に発生する微粉末の再水和メカニズムを明らかとするとともに、六価クロムの溶出特性を把握した。さらに、対象土の種類や地盤改良の用途に応じて強度品質を確保しつつ、土壤環境基準にも適合する微粉末の添加量、適用条件などについても明らかにした。

研究課題名 = シュレッダーダスト資源化・適正処理のための物理化学特性調査分析

研究期間 (西暦) = 2003-2004

代表研究者名 = 松藤敏彦 (北海道大学)

共同研究者名 = 角田芳忠 (北海道大学)

研究目的 = 資源循環型社会実現のための法律・制度が整えられ、3Rの優先順位に従った取組みが、容器包装、家電製品などの一般廃棄物を中心に始められている。しかし発生量の多さ、有害性を考えると、資源使用量削減、環境負荷低減のためには産業廃棄物の対策を早急に進める必要がある。産業廃棄物については業界の自主的取組みに任されていたが、ようやく自動車リサイクルによってシュレッダーダストの資源化が本格的に始められようとしている。組成が不安定なためにマテリアルリサイクルは難しく、サーマルリサイクル主体の資源化が考えられているが、実際のところシュレッダーダストに関するデータがきわめて少ないままに資源化システムが作られようとしている。またシュレッダーダストは自動車以外の製品の処理からも発生し、それぞれ特性が異なると考えられる。本研究は、産廃の中でも対策の急がれるシュレッダーダストの物理・化学的特性を複数の施設を対象として調査し、資源化・適正処理のための基礎データを得、資源化および万が一埋め立てられた場合の環境負荷を検討する(下記方法1)。さらに、自動車リサイクル法は資源化率の向上が第一の目的とされているが、ダスト発生量の削減をまず図るべきである。そこで廃自動車について、部品回収によるダスト発生量削減、環境負荷削減効果を、部品の物理・化学分析によって検討する(下記方法2)。

研究方法 = (1) 破碎前処理方法の異なる3箇所のシュレッダー施設で発生したダスト、および非鉄精錬会社に原料として搬入されたダスト3種類を採取した。分析対象としたのは、廃自動車ダスト4種類、廃家電ダスト2種類、自販機ダスト1種類である。試料は乾燥後粒径別にふるい分けし、物理組成分析を行った。各組成ごとに粉碎試料を作成し、工業分析(灰分、揮発分、固定炭素)、重金属含有量、発熱量を測定した。また粉碎試料を再び混合し、重金属溶出量、TOC溶出量を測定した。分析結果より、まず組成の時間変動特性を検討し、処理物ごとに工業分析値、物理組成、発熱量より資源化特性、重金属溶出量、TOC溶出量から埋立時の環境負荷を検討した。

(2) 解体・シュレッダー施設において2台の廃自動車を対象とし、部品を回収した。回収部品は重量を測定し、分解して物理組成を求めた。次に組成ごとに破碎し、工業分析、発熱量測定、重金属含有量分析、TOC溶出量測定を行った。部品重量、組成を測定できないものについては文献値を利用した。また、解体業における部品回収状況を把握するため、全国150社の解体業者にアンケートを実施し、部品ごとの回収実施率を調べた。回収実施率の順に部品を並べ、法あるいは事前選別ガイドラインで定められたフロン、エアバッグ、バッテリーのみを回収するシナリオ(S0)から本調査で回収した部品すべてを回収するシナリオ(S0)、その中間シナリオを仮定し、現状シナリオ(各部品がアンケートで得られた実施率で回収されているとする)との比較を行った。

結果と考察

(1)同一シュレッダー施設より1日4回のサンプリングを行い、シュレッダーダストの時間変動を検討した。廃自動車ダストは時間変動が大きい、ウレタン、綿ごみをどれだけ採取したかというサンプリング誤差と考えられる。廃家電ダストは硬質プラスチックが約70%を占めており、自動車、家電など処理対象が一定していれば組成は安定している。

サーマルリサイクル性を、発熱量、燃料比(固定炭素/揮発分)によって検討した。家電ダストの発熱量は約35MJ/kgであり、石炭の発熱量(約30MJ/kg)を上回る。しかしプラスチックが多いために燃料比が0.01~0.015と非常に小さく、燃料としては燃焼温度が高くなりやすいとの特徴をもつ。また燃焼時にクリンカ発生の原因となる低融点金属Na、Kを1.5~4%(両者の合計)含む。廃自動車ダスト、自販機ダストの発熱量は同程度で18~28MJ/kgとやや低く、廃自動車ダストは灰分が40%と高いため(自販機ダストは約30%)、燃料として利用するよりも、最も有力な資源化方法と考えられている溶融・スラグ化が妥当である。Na、Kの含有量(合計)は廃自動車ダストが1.5~2%、自販機ダストは1~1.2%である。ダストには5.6mm以下の小粒径物は10~30%含まれ、その60%程度は灰分である。ふるいにより容易に除去できることから、5.6mm以下を除き燃料として高品質化がはかれる可能性がある。組成別の測定値を基に推定したところ、廃自動車ダストの発熱量は10~25%増加するが、燃料利用の可能性がある廃家電ダストは小粒径物割合が10%以下と小さく、2~4%の増加に過ぎない。

マテリアルリサイクルとして金属に注目すると、含有量が最も多いのは銅であり、3~9%含まれている。銅鉱石はCuの含有量が5%あれば高品位といわれるが、それを上回るものもある。純度の高いCuを40~70%の割合で含むハーネスがダストに残留することが原因である。

埋立処分の際に最も問題となるのは、有害重金属の溶出である。Pbは0.1~1.0mg/Lであり、7試料のうち5つが特定有害産業廃棄物の基準0.3mg/Lを超えた。Cdは不検出であった(0.001mg/L以下)。TOC溶出量は廃家電、自販機ダストは20~50mg/Lと低く、安定型処分場浸出水のレベルであるが、廃自動車ダストは60~150mg/Lと高かった。

(2)解体によって回収した部品は内装(座席シート、フロアマットなど)36~52kg、外装(ボンネット、ドアガラス、ランプ類など)56~59kg、その他(ヒューズボックス、ホーンなど)4~6kgである。これらに含まれる鉄、非鉄は破碎後に回収されるが、部品回収による廃自動車ダスト削減量を回収シナリオごとに計算した。ダスト発生量は現状(S_pシナリオ)では200kg/台程度であるが、最大限の部品回収(S₄)を行うと一台あたり約40kgの減少となる。年間のELV発生台数430万台を乗じると17万トンとなり、50万都市の一般廃棄物量に相当し、削減効果は大きい。逆に法で定められた回収のみ行うS₀シナリオでは、57kg/台の増加になる。廃自動車ダストはサーマルリサイクルが有力な資源化方法とされているため、発熱量の変化を推定した。プラスチックなどの部品回収による発熱量低下を予想したが、S₄シナリオでも大きな変化はなかった。ただし、総熱量は減少する。またシュレッダーダストを管理型埋立しなければならぬのは重金属量のためだが、Pb、Cr、Cd、Znなどの重金属は、回収される部品中の含有量が少ないため、いずれの回収シナリオでも現状と比べてほとんど変化がなかった。

結論 = シュレッダーダストの特性は、処理物によってほぼ一定である。廃家電ダストはプラスチックが多いため発熱量が高くサーマルリサイクルには有利である。しかし低燃料比であるため燃焼時に高温となりやすく、クリンカ発生の原因となる低融点金属を1.5~4%含んでいる。一方廃自動車ダストは灰分が高く、燃料としての価値は廃家電ダストに較べて劣る。サーマルリサイクルとしては現在の有力な手段である溶融・スラグ化が妥当と思われる。小粒径物の除去によって発熱量上昇が見込まれるのは廃自動車ダストであるが、ス

ラグ化を行うならば総熱量が減少し、スラグ発生量が減るため意味がない。自動車リサイクルにおいては、シュレッダー業者に対して廃自動車とそれ以外のダストを分けて保管することが求められている。廃自動車ダストと廃家電ダストは発熱量、灰分の点で差が見られ、混合処理、あるいはダストの混合は特性の変動の原因となるため、やはり分けることが望ましい。マテリアルリサイクルの点から見ると、銅の含有量が高い。銅は資源化としての価値が高く、枯渇が懸念されている金属であり、回収率を上げる必要がある。

自動車リサイクル法では、資源化率を高めることが目標とされており、法で定められたフロン、バッテリーのみを回収してシュレッダー処理し、サーマルリサイクルを行っても目標資源化率は達成できる。しかし、ダスト量は現状より約30%増加し、ダストの輸送や資源化処理における環境負荷発生が大きくなる可能性がある。逆に最大限の回収を行うとしたS4シナリオでは20%減少する。解体作業は大変であるが資源化率という相対値ではなく、処理すべき絶対量を減少させるべきである。部品の回収によって、廃自動車ダストの発熱量、重金属含有量に大きな変化はない(よくも悪くもならない)。

研究課題名 = 固相バイオリアクターによる廃棄物処理

研究期間（西暦） = 2002・2004

代表研究者名 = 平石 明（豊橋技術科学大学）

分担研究者名 = 二又裕之（豊橋技術科学大学）、松澤有希子（豊橋技術科学大学）

研究目的 = 本研究の目的は、ダイオキシンやトリクロロエチレン（TCE）などの有害化学物質で汚染された廃棄物・土壌を効果的に処理できる生物学的技術を開発することである。有害化学物質の分解と生物系廃棄物処理を併用してコンポスト化できる固相バイオリアクターを開発し、有害物質を分解するだけでなく処理物の再利用を可能にするハイブリッド型廃棄物処理技術を確立することを目指す。このために、以下の主要6テーマと目的を設定して、実験研究を行った。

- (1) 固相有機物分解系の物理化学的・生化学的特性： 固相反応の基礎となる反復回分コンポスト化処理プロセス（fed-batch composting [FBC] process）における有機物分解の生化学的機構と物理化学的特性を明らかにする。
- (2) 有機物の固相分解反応に関わる主要微生物の特性評価： FBC 処理プロセスに関わる主要微生物が何であるかを明らかにする。特に処理プロセスを立ち上げたときから安定期に至るまでの微生物群集構造の変化について解析する。
- (3) 固相反応に及ぼす含水率・水分活性の影響： FBC 処理プロセスにおける有機物分解効率や優占微生物の動態に及ぼす含水率、水分活性の影響を明らかにする。特に固相バイオリアクター中微生物群集の水分活性の低下に対する抵抗性の程度や、タンパク発現への影響について明らかにする。
- (4) 有害化学物質分解に関わる微生物の動態解析、分離、および特性評価： 有害化学物質のモデルとしてジベンゾフランおよび TCE を取り上げ、これらの物質の分解に関わる微生物群集の特性評価を行う。また分解微生物を分離し、その分解特性について生化学的、遺伝学的に明らかにする。
- (5) 化学物質の疎水性担体への吸着特性： モデル化学物質と疎水性担体の吸着作用について明らかにする。特に疎水性担体として生分解性プラスチックを用いる。
- (6) 固相バイオリアクターによる汚染土壌と有機廃棄物の同時処理： リアクター内に実際にダイオキシン汚染土壌を投入して FBC 処理を行い、分解除去を試みる。

研究方法 = 固相バイオリアクターのモデルとして植木鉢を利用したリアクター（FUSBIC reactor）および市販の家庭用電動生ゴミ処理機を用いた。これらのリアクターを利用した FBC 処理プロセスを立ち上げ、この過程における有機物分解の生化学的、物理化学的特性について調べた。総菌数、生菌数測定の他、FISH 法、DGGE 法、キノンプロファイル法によって微生物群集の動態を解析した。細菌分離株は 16S rRNA 遺伝子の解析によって同定した。処理プロセスに対する含水率の影響について調べた他、水分活性値の異なる分離培地を用いて細菌を計数し、水分活性の低下に対する抵抗性や分離株の低水分活性培地における生育について調べた。水分活性を変えた培地で分離株を培養し、発現されるタンパクを二次元電気泳動で解析した。ジベンゾフラン分解微生物を分離し、分解特性を生理学的、分子レベルで解析した。フェノール供給リアクターを用いて TCE 分解性微生物群集の集積を行った。この集積微生物群集の TCE 分解性を動力学的に解析すると同時に、定量 PCR、DGGE による群集構造解析および分離株の同定試験、分解特性試験を行った。汚染化

学物質と疎水性担対との吸着相互作用については、いくつかの芳香族化合物と生分解性プラスチックを用いて解析した。吸着効果に分光光学的に評価するとともに、HPLC を用いて吸着量を定量した。生ゴミ処理機を利用した固相バイオリアクターにダイオキシン汚染土壌および有機廃棄物を投入し、ダイオキシンの消長を高分解能 GC/MS で分析することにより、分解除去を評価した。

結果と考察 = 主要 6 テーマについて以下の結果を得た。

(1) 固相有機物分解系の物理化学的・生化学的特性

FUSBIC リアクターおよび市販の電動処理機を用いて生ゴミの FBC 処理を行なった結果、処理開始から約 3 週間以降で分解活性が、また 1 カ月以降で温度、pH、含水率、バイオマス量などが安定することが判明した。また、この処理期間中、水分活性は低下し続けた。さらに、FBC 処理プロセスの起ち上げ過程において、微生物群集は 2 段階の増加パターンを示すことがわかった。これらの物理化学的、生物学的プロファイルは、FBC 処理プロセスの特徴と考えられる。

(2) 有機物の固相分解反応に関わる主要微生物の特性評価

FBC 処理プロセスの起ち上げの期間、主要細菌がプロテオバクテリア門 (phylum *Proteobacteria*) からアクチノバクテリア門 (phylum *Actinobacteria*) の菌種に変化することが判明した。この事実は、生ゴミに由来するプロテオバクテリアが、馴養されていない初期過程の有機物分解に関わり、徐々に固相反応により適したアクチノバクテリアが優占して有機物分解に関わっていくことを示している。また馴養期間の途中で、培養では検出できないバクテロイデス門 (phylum *Bacteroidetes*) 細菌が一時増加することが認められた。

(3) 固相バイオリアクター内微生物群集に及ぼす含水率・水分活性の影響

FBC 処理プロセスにおける含水率の影響について調べた結果、アクチノバクテリアの優占化と活性発現には特に含水率が関係しており、含水率 30 ~ 40% で高い分解活性が得られた。このデータに基づいて市販生ゴミ処理機の含水率を 40% に制御しながら運転した結果、格段の処理効率の上昇がみられた。

完全馴養した固相バイオリアクターと水系の活性汚泥の生菌数を異なる水分活性に調整した寒天平板法で計測したところ、活性汚泥では水分活性の低下に対応した生菌数の落ち込みが顕著であったのに対し、固相バイオリアクターでは減少がなだらかであった。この結果は、固相バイオリアクター内には、水分活性の低下に抵抗性を示す細菌が多く存在することを示している。このプロセスからの分離株について、水分活性の抵抗性について調べた結果、プロテオバクテリアよりもアクチノバクテリアの方が低水分活性に耐性を示すことがわかった。さらに、アクチノバクテリアの分離株について、水分活性とタンパク発現の関係を二次元電気泳動によって調べたところ、低水分活性で誘導されるタンパクの存在が示された。

(4) 有害化学物質分解に関わる微生物の動態解析、分離、および特性評価

ジベンゾフラン有機溶媒溶液を塗布した寒天培地を調製し、環境中からのジベンゾフラン分解菌の検出・分離を試みた。その結果、本培地が多数の分離株を簡便に試験するのに有効であり、八口の形成や黄色色素の形成に基づいて分解活性のみならず、代謝経路までもある程度推測できることがわかった。分離されたジベンゾフラン分解性グラム陽性菌数株について、分解特性を調べた結果、従来とは異なる黄色代謝産物を産生する株が見つかった。この株は遺伝子レベルで分解に関わる三つの末端ジオキシゲナーゼを有していることが示唆された。

TCE を効率的に分解できる微生物群集をフェノールを供給することにより馴養・集積した。その結果、フェノール負荷量 1.5 g/L/日 で高 TCE 分解活性を有する微生物群集が集積できること、および集積した微生物群集の TCE 分解機能は *Variovorax* 属細菌が担っていることが明らかとなった。分離された *Variovorax* 属細菌は、TCE のみならず、ジベンゾフランなどの様々な芳香族化合物に対する分解性を示した。

(5) 化学物質の疎水性担体への吸着特性

モデル汚染化合物としていくつかの芳香族化合物を取り上げ、疎水性担体であるプラスチックとの吸着作

用について検討した。その結果、試験したほとんどの生分解性プラスチックがジベンゾフラン、ピフェニル、ビスフェノール A などの芳香族化合物を吸着除去する性質があることがわかった。この吸着作用は、生分解性プラスチックおよび化学物質が持つ物性の両面によるものと考えられた。固相バイオリアクター中にこのような疎水性担体が存在することによって、共存する汚染化学物質の微生物分解に大きな影響が出るものと考えられる。

(6) 固相バイオリアクターによる汚染土壌と有機廃棄物の同時処理

固相バイオリアクター中にダイオキシン汚染土壌を投入し（初期濃度 5,400 pg-TEQ/g 乾土）、生ゴミを毎日添加しながら、至適条件で FBC 処理を行った。その結果、運転 270 日目で分解除去率は 75% に達した。これは 1 ヶ月あたり 450 pg-TEQ/g（乾土）のダイオキシン除去速度に相当する。

結論 = 本研究では、生物系有機廃棄物の反復回分処理プロセスの実験によって、固相反応の物理化学的、生物学的特性を明らかにした。この処理系においては含水率および水分活性が重要な因子であり、アクチノバクテリアを中心とする微生物群集が主要な役割を担っていることが明らかとなった。これらは、低水分活性と疎水的環境に適した微生物と考えられる。固相バイオリアクターにダイオキシン汚染土壌と生ゴミを投入して処理を行った結果、ダイオキシンが効率的に分解されることが判明した。これらの結果は、生物系有機廃棄物存在下での有害化学物質の分解処理とコンポスト化が可能であることを示唆している。

研究課題名 = 焼却灰中のダイオキシン類を対象とした微生物分解技術の開発に関する研究

研究期間 (西暦) = 2001-2003

代表研究者名 = 古市 徹 (北海道大学大学院工学研究科)

共同研究者名 = 谷川 昇 (北海道大学大学院工学研究科)、石井一英 (北海道大学大学院工学研究科)、惣田 昱夫 (神奈川県環境科学センター)、塩山昌彦 ((株)クボタ)、岡村和夫 (清水建設(株))、峠 和男 ((株)大林組)、伊 順子 ((株)環境管理センター)、笹井 裕 (東和科学(株))、郷田浩志 (東和科学(株))、西村和子 (千葉大学真菌医学研究センター)、亀井克彦 (千葉大学真菌医学研究センター)

研究目的 =

本研究の目的は、解体焼却炉周辺土壤中のダイオキシン類 (以下、DXNs) と不適正最終処分場の焼却灰中の DXNs の微生物分解処理技術の開発である。具体的には、DXNs を含む焼却灰の実態調査を通して、焼却灰中の DXNs による環境汚染の可能性と修復ニーズを明らかにする。-1 それら DXNs 汚染物のバイオリクター処理または -2 静置 (原位置攪拌も含む) 処理の各プロセスについて、DXNs を効率的に分解処理できる条件を明確にする。DXNs 微生物分解メカニズムを明らかにするために、DXNs 分解経路を推定し、分解に関与する酵素の精製を試みる。環境省及び経産省の微生物安全性に関するガイドラインを参考に、本研究で扱う微生物の安全性評価を行う。最後に、具体的に濃度レベルや汚染形態が異なる DXNs 汚染現場を想定し、本プロジェクトで開発した微生物処理技術の位置づけや適用性を明らかにする。

研究方法 =

焼却施設や最終処分場の統計資料や過去の DXNs 分析資料、そして実汚染現場の実測データを参考にし、焼却灰中 DXNs による汚染の可能性について検討した。

-1 能勢町の汚染土壤中の DXNs、及び焼却灰の中でも特に濃度の高い飛灰中の DXNs を対象に、本プロジェクトで同定した DXNs 分解菌 *Pseudallescheria boydii* (以下、*P. boydii*) 北大株によるバイオリクター処理条件の検討を行った。まず、バイオリクターの攪拌条件、飛灰中の塩類による *P. boydii* 北大株の増殖阻害条件を明らかにした上で、対象物の前処理方法を検討した。また、微生物処理後土壤中の残存 DXNs の溶媒 (エタノール、イソプロパノール、クエン酸) 抽出による後処理を検討した。そして、容量 5L のバイオリクターを用いて、能勢町の汚染土壌及び 2 種類の飛灰混じり土壌の *P. boydii* 北大株による DXNs 分解実験を行い、前処理及び後処理も含めた処理プロセスにおける DXNs 処理効率を明らかにした。

-2 静置 (原位置攪拌) 処理を想定し、標準砂に、無塩素ダイオキシン類、または有塩素ダイオキシン類 (1 価及び 2 価) を添加し、含水率を約 10%、30 の条件で静置して、フラスコレベルでの *P. boydii* 北大株による DXNs 分解実験を行った。特に、グルコースや窒素、リンなどの栄養添加物の有無による分解特性の把握を行った。

P. boydii 北大株の DXNs 分解は、脱塩素プロセスと開環を伴う酸化プロセスからなると想定されたことから、酸化分解による分解代謝物の検出を試みた (過去の研究により、OCDD (8 価) から HpCDD (7 価) への脱塩素反応は確認している)。また、*P. boydii* 北大株による 2,3,7,8-TCDD の分解機構を把握するた

めに、*P. boydii* 北大株の生菌、菌体外酵素、菌体内膜酵素による分解実験を行った。さらに、DXNs 分解に関与する酸化酵素及び脱塩素酵素の精製を試みた。

まず、本研究で扱う *P. boydii* 北大株の特性を、18S rDNA 解析等に基づき明らかにした。次に、*P. boydii* 北大株の滅菌方法を温度、時間、エタノール濃度の 3 点から検討した。また、免疫抑制されたマウスに *P. boydii* 北大株と他の *P. boydii* 株の胞子を静注して、感染モデルを作成し、マウスの生存率、病理学的所見等により、北大株と他の株との病原性の比較検討を行った。さらに、*P. boydii* 北大株と代表的な病原真菌である *Aspergillus fumigatus* との病原性の比較も行った。加えて、抗真菌剤への長期曝露による耐性誘導性を確認するために、1 週間又は 2 週間の間隔で代表的な抗真菌剤を *P. boydii* 北大株に加え、合計 1~2 ヶ月の曝露試験を行った。

実汚染現場のデータを参考に、焼却場跡地と不適正最終処分場における焼却場由来の DXNs 汚染(100~7,000 pg-TEQ/g)を想定して、本研究で開発した微生物処理の適用性を検討した。特に、DXNs 濃度レベルに応じた微生物処理技術の位置づけを明確にすることとした。

結果と考察=

焼却灰と飛灰の混合灰が埋立てられてきた一般廃棄物最終処分場における、過去の DXNs の測定結果より、混合灰の DXNs 濃度の平均値は約 5ng-TEQ/g であり、埋立基準 (3ng-TEQ/g) を超えている最終処分場の存在が示唆された。また、高濃度 DXNs 汚染事例や汚染機構の検討により、不適切に管理されている焼却施設の敷地や周辺の土壌は、DXNs によって汚染されている可能性が高いことが分かった。さらに、5ng-TEQ/g の混合灰が埋め立てられている最終処分場では、条件によっては、DXNs が溶出して、周辺地下水が環境基準 (1pg-TEQ/L) を越えて汚染される可能性が示唆された。

-1 *P. boydii* 北大株には、培地中塩素イオン濃度 20g/L 以上、そして pH10 以上で、増殖阻害が生じるので、処理プロセスには洗い出し、pH 調整等の前処理が必要であることが分かった。また、溶媒抽出に関しては、イソプロパノールあるいはクエン酸を利用すると 10%強の飛灰中 DXNs が抽出された。さらに、能勢町汚染土壌 (初期濃度: 約 7,300pg-TEQ/g) については、バイオリクター出口で約 60%、後処理としての溶媒 (エタノール) 抽出処理も合わせると 92%の処理が達成できた。また、飛灰混じり土壌 (初期濃度: 約 170pg-TEQ/g、約 2,200pg-TEQ/g の 2 種類) に関しても、リアクター出口でそれぞれ、約 60%、40%の DXNs を処理できた。

-2 静置処理実験の結果、特に栄養源の添加が無くても、*P. boydii* 北大株によって無塩素 DXNs を分解できることを確かめた。しかし、本実験範囲内では、1~2 塩素化 DXNs の顕著な分解は見られなかった。これは、静置状態であったことが原因であると考えられ、適切な切り返し攪拌条件などの検討が必要であることが示唆された。

P. boydii 北大株による DF (ジベンゾフラン) の酸化分解代謝物である 2-OH-DF、及び OH 基の水素がメチル基に置換した化合物を検出した。これより、*P. boydii* 北大株のダイオキシン骨格の酸化分解が示された。生菌による 2,3,7,8-TCDD の分解実験において、ブランクには存在しないピークを確認できたことから、*P. boydii* による 2,3,7,8-TCDD の分解が示唆された。さらに、DD (ジベンゾ-p-ダイオキシン) 及び OCDD 分解酵素の精製可能性を示され、今後、酵素処理を念頭に、DD 及び OCDD 分解酵素の遺伝子解析が行える目処がたった。

18S rDNA 解析及び形態学的観察を行ったところ、本研究で扱った *P. boydii* 北大株の特性は、病原性真菌危険度分類では最も弱いレベル 1 であることが判明した。また、*P. boydii* 北大株は、他の *P. boydii* 株の病原性と同等程度と評価され、通常の手扱で問題の無いことを確かめた。加えて、実汚染現場への使用

を想定し、*P. boydii* 北大株の胞子の滅菌法を検討した結果、70 15 分以上の温度条件で全ての胞子が殺菌されることを確認し、さらに、耐性誘導の有無については、8 週間の連続曝露条件においても耐性獲得は見られないことを確かめた。

本研究で開発を行った *P. boydii* 北大株を用いたバイオリアクター処理技術の実汚染現場への適用性を検討した結果、DXNs 濃度レベルが、数千 pg-TEQ/g の焼却場由来の土壌・焼却灰については、撤去 - バイオリアクター処理することにより、環境基準値(1,000 pg-TEQ/g)以下、或いは埋立基準値(3,000 pg-TEQ/g)以下にまで処理できることを示した。また、日処理量 2m³ の時のコストは約 7.6 万円/m³ と推算され、現状の溶融や焼却処理よりも有利な条件であると考えられた。しかし、他の脱ハロゲン反応を利用した化学的処理等と同程度の処理コストということを考慮すると、さらに処理コストの低減化を講じる必要がある。一方、要調査基準 (250 pg-TEQ) 以上、環境基準値 (1,000 pg-TEQ/g) 以下の土壌・焼却灰については、静置 (原位置攪拌) 処理の可能性が実験から推察され、実汚染現場への適用性に関しても処理コストが 3 ~ 7.5 万円/m³ であれば、微生物処理の十分な需要があると評価された。

結論=

DXNs を含む焼却灰を野積み保管する等の不適切な管理によって焼却炉敷地内やその周辺の土壌汚染が生じる可能性があること、そして混合灰を受け入れてきた不適正最終処分場及びその周辺地下水が汚染されている可能性があることを指摘した。

-1 含水率 70%、培地塩類濃度 20g-Cl/L 以下、培地 pH 10 以下、30 の条件で、*P. boydii* 北大株を用いた 48 ~ 96 時間のバイオリアクター運転により、飛灰混じり土壌 (初期濃度: 約 170pg-TEQ/g、約 2,200pg-TEQ/g の 2 種類) については約 40 ~ 60%、能勢町の汚染土壌 (初期濃度: 約 7,300pg-TEQ/g) については、溶媒抽出処理も含めたトータルプロセスで 92% の DXNs 処理効率を得ることができた。

-2 *P. boydii* 北大株を用いた静置実験では、無塩素体であるジベンゾフラン(DF)、ピフェニル、ジベンゾ-p-ダイオキシンの減少を確認した。これより、静置した状態であっても、これらの汚染物質を分解除去できる可能性を示した。

P. boydii 北大株の DF の分解中間生成物を検出できたことから、*P. boydii* 北大株の DF の酸化分解反応の存在が、ほぼ確認された。また、2,3,7,8-TCDD 分解酵素が菌体膜に存在する可能性、DXNs 分解に関与する DD 及び OCDD 分解酵素の精製可能性を示すことができた。

本研究で扱う *P. boydii* 北大株は、病原性真菌危険度分類では最も弱いレベル 1 であることが判明した。また、70 15 分間で、胞子の殺菌ができること、また坑真菌剤の長期曝露による耐性誘導性は無いことを確かめた。以上より、汚染土壌・焼却灰の処理プロセスを構築する際に、*P. boydii* 北大株によるリスクを制御できることが示唆された。

焼却場跡地及び不適正最終処分場への、DXNs 微生物分解処理の適用性を検討した結果、数千 pg-TEQ/g の焼却場由来の土壌・焼却灰に対して、撤去して、*P. boydii* 北大株を用いたバイオリアクターにより、環境基準値(1,000 pg-TEQ/g)以下、或いは埋立基準値(3,000 pg-TEQ/g)以下にまで処理できることを示した。また、低濃度レベル (1,000 pg-TEQ/g 以下) の土壌・焼却灰に対する静置処理の可能性を示すことができた。

以上より、汚染土壌及び焼却灰中の DXNs の微生物 (*Pseudallescheria boydii* 北大株) を用いた処理プロセスを提案し、特にバイオリアクターに関しては、環境基準値以下、或いは埋立基準値以下にまで処理するための運転条件を示すことができた。さらに、本研究で開発した微生物処理プロセスが、実際の DXNs 汚染現場へ適用できることを示した。

研究課題名 拡大生産者責任（EPR）に関する費用便益・リスク便益分析（廃棄物適正処理研究）

研究期間 2001年～2004年

代表研究者名 山口 光恒 （慶応義塾大学）

共同研究者名 岡 敏弘 （福井県立大学）

研究目的 拡大生産者責任(EPR)の原則を適用した政策の評価を行うために、なぜEPRの原則がとられるかという根拠を理論的に明らかにし、それを実証すること。

研究方法 (1)なぜEPRかに関する議論をレビューし、独自の論理を構築した。(2)それを表現する理論モデルを作った。(3)家電リサイクルについて現実のデータからそれを立証した。

結果と考察

1. なぜEPRか

なぜEPRかについてのOECD等の議論を整理し、その混乱を正す中から、独自の理論を構築した。つまり、(1)EPRもPPPも外部性制御のための政策の原則である。EPRは、外部性のうち、放置すれば公害となるであろう廃棄物を、公共サービスを無償で提供して処理すること自体の外部性の制御にかかわる原則である。(2)OECDのEPRに関する政府向け指針書は、EPRとPPPとを代替的の原則としながら、EPRを採用する理由を、価格信号の伝達障害故に環境目的が達成されないという点に求めている。しかし、第1に、PPPすなわち価格信号を用いた政策ではない。第2に、価格信号の伝達がうまくいかなければいかに、外部性の発生点に政策の目標を絞るPPPが、環境目的の達成のために有効だったのではないか。(3)EPRの根拠は、むしろ、外部性制御という目的に関して、PPPで排出者に責任を負わせるよりも効率的であるという点に求めるべきである。排出者に責任を負わせた場合に効率的でなくなる理由は、収穫逓増等の要因により、価格信号を利用した誘導政策が効率的な資源配分に導かず、したがって、規制的・計画的手法がむしろ効率的であるが、その規制も、直接排出者のところだけを対象としたのでは、排出者にとっての選択肢の中に、最も効率的な対処法が入ってこないということである。

2. なぜEPRかを表現する理論モデル

(1)再生紙と新紙の例

再生紙と新紙についての選好を異にする人々が紙への需要をもつ市場で、それぞれの生産に規模の経済性(収穫逓増)があるとき、廃棄物処理費用を含めた社会的費用の観点からは、再生紙を最大限使うことが最も効率的であるにもかかわらず、廃棄物処理費用をごみ有料化によって内部化する政策では、その状態が実現せず、消費者が単にごみ料金を払いながら、いままでどおりの消費を続ける事態が起こりうることを示す例を作った。消費者による再生品選択の市場に加えて、ごみ排出行動をモデルに組み込み、回収量と再生品需要量との整合性を介在させた。社会的に効率的な状態を実現するには、ごみ処理費用よりもはるかに高い禁止的な料金をかけるか、さもなければ、再生紙の使用を義務づけたり、再生紙の生産量の目標値

を設定したりする規制が必要であり、そのためには、計画的なりサイクル体制を作る必要があることが明らかになった。

(2)使い捨て容器と再利用(または再資源化)容器の例

使い捨て容器と再利用(または再資源化)容器による飲料供給で、使い捨て容器は再利用容器に比べて生産費が安く、使い捨て容器は再利用容器に比べて消費者にとっての利便性が大きく、そのことが、需要関数に現れるというモデルを作った。その下で、ごみが有料化され、料金がごみ処理の限界費用に等しく設定されても、再利用容器は採用されず、しかし、再利用容器を採用した方が社会的純便益は大きいという場合があることを示した。ここでも、社会的効率性を実現するためには、ごみ処理費用よりもはるかに高い料金を課すか、さもなければ、再利用容器の使用を義務づけるような規制が必要である。

(3)収穫逦増の連鎖を表現する理論モデル

リサイクル工場と、再商品化資源を利用する場面、および、製品設計場面での収穫逦増の相互作用を理論化した。家電製品の生産や再資源化された素材の利用の面にも、規模の経済性が存在する。家電リサイクルの規模が拡大し、再資源化される素材の市場に出される量が大きくなるに従って、それを利用する場面での平均費用が下がる。それは、再資源化された素材の販売価格を高めたり、あるいは逆有償の程度を引き下げたりすることによって、家電リサイクル事業の平均費用曲線を下にシフトさせるであろう。このとき、消費者に、廃棄物処理費用を負担させるだけの政策では、それらの連鎖を發揮して、効率的なりサイクル量が実現するということが自然に起こるとは期待できない。

3. 家電リサイクルにおける規模の経済性とその連鎖の実証

EPR の役割についての以上の理論を、家電リサイクル政策の場合について立証した。家電リサイクルの事業における規模の経済性の程度を確かめ、それに対して現状におけるリサイクルの規模がどこにあり、効率的な状態が何であり、現行の家電リサイクル制度がそれを達成しているかどうかを確かめ、また、仮に PPP を適用して廃家電の排出に課金するといった政策ではどのような状態が出現したかを予想した。

(1)モデル・プラントにおける平均費用曲線を推計した。これによって、直接埋立との単純な比較ですら、リサイクルした方が効率的となるような、リサイクル処理の規模を求めることができる。2 年目の推定では、直接埋立費の高い地域では、平均輸送距離が 20km の時は、年間 42 万台以上でリサイクルが効率的となるが、平均輸送距離が 250km になると、68 万台処理しなければリサイクルが効率的とならないことがわかった。3 年目は、処理台数が増え、再商品化率が向上した結果、平均費用曲線は下方にシフトし、埋立処分よりも安い費用でリサイクルできるという意味で効率的な処理数量が、平均輸送距離 20km で 41.0 万台/年、50km で 42.8 万台/年、100km で 46.2 万台/年、150km で 50.3 万台/年、200km で 55.1 万台/年、250km で 60.9 万台/年へと下がった。

(2)全国(沖縄を除く)を 13 の地域に分割して、地域ごとのリサイクル工場の、各工場の平均費用を推定した。これによると、大半の地域では、今後処理台数が増えれば、また、埋立費用が高くなれば、サイクルが効率的となることがわかる。現状では効率的かどうかぎりぎりだが、規模が大きくなると社会的に効率的となるという状況を、家電リサイクルにおける EPR は作りだしたことがわかった。

(3)プラスチックの再商品化率向上による平均費用曲線の下方シフトを立証した。将来プラスチックの再商品化率が 15%に上がり、その価格が 1000 円/t に相当するようになると、埋立処分よりも安い費用でリサイクルできるという意味で効率的な処理数量は、平均輸送距離 20km で 37.8 万台/年、50km で 39.3 万台/年、100km で 42.2 万台/年、150km で 45.6 万台/年、200km で 49.5 万台/年、250km で 54.2 万台/年に下がると予想された。

4. 結論

EPR 政策がなぜ望ましいかを、効率性の観点から言えるのではないかという視点から、現実の家電リサイクルにおける費用曲線の形状を明らかにし、収穫逓増の傾向を確認した。社会的に見て、少なくとも、ごみとして直接埋め立てる場合と比較して少ない費用でリサイクルできるという意味で効率的な状況を実現するには、処理台数が、1 処理工場あたり 40～60 万台/年なければならないことがわかった。まとまった規模の処理台数を生み出すには、計画的にリサイクル体制を構築する必要があった。また、処理と利用との規模の経済性連鎖により、規模が大きくなればなるほど平均費用はさらに低下すると予想する理論モデルを作り、実際の平均費用曲線の低下を予想した。こうした、処理と利用における規模の経済性の連鎖の下では、単なる有料化政策は、費用負担者だけを変え、処理方法を従来そのままにとどめる可能性がある。規模の経済性を現実のものとするためには、家電品製造者がまとめて輸送からリサイクル工場の建設・運転までの体制を計画的に構築することに意味があったのである。

研究課題名 = 最終処分場管理における化学物質リスクの早期警戒システムの構築

研究期間 (西暦) = 2001-2003

研究代表者 = 山田正人(独立行政法人国立環境研究所)

共同研究者 = 井上雄三、酒井伸一、大迫政浩、安原昭夫、毛利紫乃 (以上 独立行政法人国立環境研究所)、木苗直秀 (静岡県立大学)、小野芳朗 (岡山大学)、楠井隆史 (富山県立大学短期大学)、岡村秀雄 (神戸大学)、国本学 (北里大学)、迫田章義 (東京大学)、貫上佳則 (大阪市立大学)、松藤康司 (福岡大学)

研究目的 =

化学物質汚染への住民の不安感により、最終処分場等の廃棄物管理施設の設置や運営が困難になっている。住民の安心を得るためには、モニタリングの分析項目数や頻度を増やさざるを得ず、これが維持管理費用を高騰させている。予防原則に基づいた包括的、迅速かつ費用負担の少ないリスクポテンシャルの把握とそれに応じた合理的な対策立案が希求されている。そのためには、優先的に管理すべき「場」と「化学物質群」の選択、予測不能なリスクへの対応、対策発動の判断基準の設定、ならびにリスクコミュニケーションのための最終処分場に対応した合理的な物差しが求められる。本研究は最終処分場における精緻かつ合理的なリスク管理を目指し、(1) 優先管理すべき化学物質の順位付表 (プライオリティリスト) を作成、(2) 生化学・生物試験を現場監視に適合させ、指標の総合性と不確実性に配慮し、対象環境や施設特性等に対応した試験の最適な組み合わせ (テストバッテリー) と結果の提示手法 (スコアリング) を検討、(3) 予防的かつ合理的な対策発動の基準値 (アクションレベル) を設定することにより、「早期警戒システム」の構築を目指した。

研究方法と成果 =

< 統計解析による優先化学物質の選定手法の確立 >

RCRA Waste Minimization List of Persistent, Bioaccumulative and Toxic chemicals の手法を参考に、「循環・廃棄物分野における化学物質プライオリティリスト」のプロトタイプを作成し、対象物質の再検討と、環境中での存在 (Environmental Presence) 基準の改良、量 / 普及 (Quantity/Prevalence) 基準、および社会的関心度 (Public or Government Concern) 基準の改良を行った。日本におけるプライオリティリストの作成のため、PRTR 法施行により発表された報告データを Quantity/Prevalence に導入した。また国発表データにおける重金属データの不足による評価のバイアスを改善するため、地方公共団体で実施された大気、水質、底質における重金属類の分析状況をまとめてデータベース化し、プライオリティリストを改訂した。結果として、リストの上位にこれまで下位にあった重金属類がランクされた。

< 浸出水中の化学成分の分析と存在形態 >

埋立物や浸出水水質の履歴等が明らかである 6 処分場より、浸出水 (処理施設原水) 9 試料、処理水 7 試料について化学分析 (一般水質、無機元素・イオン類、吸着型全有機ハロゲン (AOX)・フェノール・フタル酸エステル・有機酸) を行った。無機成分はほぼ全体像が把握された。浸出水ではアルカリ金属ならびにアルカリ土類金属が主成分であり、有害金属類の濃度は極めて低い。有機成分では全有機炭素 (TOC) が 100mg/L 以上を示したが、詳細成分分析でうち 1~数% を把握した。個別成分としては 1,4-ジオキサン、ノニルフェノール、ビスフェノール

A、ジクロロフェノール、1,4-ジクロロベンゼン等が常時検出されたが、生物試験結果と対比するためには、例えばハロゲン化合物や窒素化合物等、化学特性を総体として把握する分析手法開発が必要と考えられた。また、重金属等の個別物質の計測値から毒性影響全体の推定は困難であったが、浸出水では腐植物質との錯体として存在し、錯生成能が金属種によって異なることが明らかとなり、毒性発現へ影響が示唆された。

<急性毒性試験>

ヒト培養細胞、両生類初期胚、魚類、藻類、甲殻類の生物個体、また海洋性細菌を使用した急性毒性試験は、ろ過操作のみで浸出水試料に適用可能であり、浸出水における生態毒性と水処理におけるその低減効果が評価できた。毒性と化学パラメーターとの相関分析から毒性原因物質を推定した結果、浸出水では生態毒性の原因物質を高濃度塩類ならびにアンモニア態窒素で説明できる事例もあったが、多くの試料では検出された化学物質の濃度のみで生態毒性を説明することは困難であった。すなわち、生物試験の未知物質に対応した包括的な毒性検出法としての有効性、ならびに複数生物試験（すなわちバッテリー）の適用の必要性が確認された。

<水生生物によるバイオマーカー試験>

浸出水に曝露させたヒメダカによる CYP1A 活性測定およびピテロジェニン誘導試験を行い、CYP1A 活性とピテロジェニン誘導に関連する化学物質を調べ、との重回帰分析より、優先監視物質を検索した。ムラサキイガイの致死およびバイオマーカー試験では、急性毒性、DNA 損傷性、血球細胞の貪食能による免疫毒性でという各指標の独立性が示された。

<魚類ならびに細菌を用いた遺伝子毒性試験>

金魚による小核試験（末梢血、鰓）、コメット試験（末梢血）では、予備急性毒性試験に基づき各試料を段階的に希釈して曝露した。処理による毒性の減少傾向と、両パラメータの独立性がしめされた。試験管内遺伝子毒性試験では試料の固相抽出が慣例であるが、包括、迅速ならびに簡易化を行うため、マイクロプレートを使用した *umu* 試験菌体濃縮手法と試料の減圧濃縮を用い、10 倍程度の原水濃縮試料で対照の最大 1.5 倍程度の応答曲線が検出された。埋立模型槽を用いて、廃棄物の種類および埋立条件による変異原物質（Ames 試験）の生成要因について検討した。焼却残渣主体の埋立処分では、有機物含有量と変異原性が正の相関傾向にあること、毒性の発現は好気性代謝と関係があること、毒性の強さでは嫌気性埋立と準好気性埋立の差はほとんどないが、出現は準好気性埋立が嫌気性埋立に比べて早いこと、浸出水の生物的酸化処理施設において変異原物質の生成と分解が生じていることが明らかになり、トータルでは酸化分解過程で変異原物質が分解されることが示唆された。

<スコアリングとバッテリーの構築によるアクションレベルの設定と普及への検討>

異なる生物種ならびにエンドポイントを有する生物試験法アウトプットの相互比較のため、統計学的な毒性応答が得られる希釈率または陽性反応の信頼限界に基づいて、毒性の強度を 3 段階にスコアリングし、埋立廃棄物の種類や埋立年数等によって発現する浸出水毒性を整理した。生ごみ等が混合埋立される処分場の浸出水では、ブロードな毒性カテゴリーで 2 以上のスコアが得られたが、焼却残さ等が主体の処分場では高スコアは遺伝子毒性や植物毒性等に限られていた。また、埋立後の年数が長い処分場では全体としてスコアが小さかった。処理水では浸出水と比較してスコアが低下していたが、その程度はカテゴリーならびに施設構成により異なっていた。各遺伝子毒性試験間、また急性毒性と内分泌攪乱性の間ではスコアにほとんど相関が見られなかった。これは用いた試験系の指標としての独立性を示すものであり、包括的な監視のためには、遺伝子毒性・急性毒性・生体内酵素誘導能など、エンドポイントに応じたカテゴリー分けを行い、各カテゴリーから使用目的、試験の難易度、

簡便性やコスト、浸出水の水質特性に対する適性を考慮して試験を選択し、バッテリーを構築することが必要であることを示した。

バイオアッセイバッテリーの選択から、アクションレベルを設定する手法について検討した。例えば、浸出水処理施設の維持管理を想定すると、処理後に十分にスコアが低下しない毒性カテゴリーに対応した試験法をバッテリーとして選択し、スコアが低下するアッセイ数と程度が、モニタリングの継続や施設改善等のアクションレベルに対応するものと考えられた。

これら成果を用いた早期警戒システムの運用マニュアルの作成に向け、処分場管理者等に対して意識調査を行い、生物試験法の必要性また実用化に向けた制度・技術的な課題を抽出した。生物試験法には特に水処理施設の評価、リスクコミュニケーションへの活用が期待されていた。また、課題として、利用者に解りやすい結果の表記法と手法の標準化が挙げられた。

[備 考] 研究代表者：山田正人、分担研究機関：静岡県立大学、岡山大学、東京大学、富山県立大学、北里大学、神戸大学、大阪市立大学、福岡大学、協力研究機関：東京高専、埼玉県環境科学国際センター、千葉県環境研究センター、栃木県保健環境センター、東京都環境科学研究所、神戸市環境局

研究課題名 = 超臨界二酸化炭素抽出法による固体廃棄物中の重金属類の除去技術

研究期間 (西暦) = 2001-2004

代表研究者名 = 後藤元信 (熊本大学)

共同研究者名 = 佐々木 満 (熊本大学) 児玉昭雄 (熊本大学 (H14.12.1 より金沢大学)) 廣瀬 勉 (熊本大学)

研究目的 = 本研究は環境低負荷の超臨界二酸化炭素を溶媒としてキレート剤を用いることにより、固体廃棄物中に存在する重金属類を効率的に除去し、回収するシステムを構築することを目的とする。超臨界二酸化炭素に重金属類は一般に溶解しないが、錯体を形成させるためにキレート剤を導入することで、重金属類の効率的な抽出が可能となる。本プロセスでは有機溶媒を用いないため、環境への2次汚染を防ぐことができるグリーンケミストリー技術である。また、超臨界流体は優れた物質輸送特性を有している為、固体廃棄物中の細孔に容易に浸透し、効率的に重金属類を回収することができる。対象物質として、昨年度は、焼却飛灰および銅・クロム・砒素を含有するCCA防腐処理廃材を用いて、各種重金属類が効率的に抽出されることを明らかにした。本年度は、廃触媒からの金属類の分離回収を目指し、昨年度に引き続いてパラジウム含有球状触媒からのパラジウムの抽出回収を検討した。多孔体である固体触媒からの金属類の抽出においては物質移動が重要となることが予測され、優れた輸送物性を有する超臨界流体を用いることにより、迅速で効率的な抽出が期待できる。

研究方法 = 実験材料として焼却飛灰、CCA廃材、パラジウム触媒として球状の0.5%Pd アルミナ球：DASH-520D触媒(エヌ・イー・ケムキャット株式会社)、ハニカム構造の廃自動車触媒を抽出実験に用いた。超臨界流体として炭酸ガスを使用した。キレート試薬としてCyanex302 [Bi(2,4,4-trimethylpentyl) mono thiophosphinic acid]、TTA (thenoyl trifluoro acetone)、TOPO (tri octylphosphin oxide)、Aliquat 336 (tri-n-octylmethyl ammonium chloride)、AA (アセチルアセトン)、TBP/HNO₃ (トリブチルリン / 硝酸) を使用した。

実験装置としてはキレート剤の抽出槽と試料からの金属類の抽出槽からなる超臨界二酸化炭素半流通抽出装置を用いた。抽出槽中の金属類はキレート剤と錯体を形成し、超臨界二酸化炭素により抽出される。金属錯体を溶解した超臨界二酸化炭素は、連続的に溶出され、背圧弁を通して大気圧まで減圧されることにより、トラップ容器中に回収される。分析はクロロホルム中に捕集された抽出物をHClで逆抽出し、得られた液中の重金属類の濃度をICP発光分析装置により測定し、抽出率を算出した。また、インライン紫外吸光度計での抽出挙動の測定も行った。実験圧力、温度はそれぞれ8 - 20MPa、313K - 353Kで行った。

結果と考察 = 飛灰についてはFe, Mg, Pb, Ti, Znの金属について検討し、Cyanex302使用時に抽出率は圧力の増加に伴い増加した。また、Tiを除く全てが温度増加に伴い抽出率が増加した。温度、圧力の増加による抽出率の増加は二酸化炭素密度が増加し、そのため抽出反応が促進されたことが考えられる。次に

抽出率に及ぼす抽出セル内への少量の水添加の影響を検討した。水の存在により Fe, Mg, Pb, Ti, Zn の抽出率は増加し、特に Zn については2倍以上の抽出率の増加が見られた。また、Mg についてはその抽出率は半分以下になった。これは容易に水和するアルカリ金属である Mg の性質に因ると考えられる。次に抽出セルへ添加する水の量を 0.1 から 0.3 ml と変化させた場合 0.2 ml 添加時が最も高い抽出率を示した。これは抽出において適当な量が存在することを示している。適量は錯形成に有効であると考えられるが、過剰量は溶解度あるいは輸送性能を下げる要因になっているのではないかと考えられる。TBP/HNO₃ 使用時、高い抽出率が得られ、Fe において非常に高い結果をえた。

次に抽出率の向上を目的に長い抽出時間に渡ってキレート剤が寄与するように連続供給法を用い抽出率について調べた結果、温度 333 K、圧力 2.4 MPa、0.1 ml の水添加、Cyanex302、抽出時間 180 分において Fe, Mg, Pb, Ti, Zn の抽出率はそれぞれ 18.45、1.71、38.32、0.6、48.99 であった。この結果よりキレート剤の連続供給により抽出率の増加が見込める。Mg、Ti についてはキレート剤の選定が必要であると考えられる。

C C A 廃材からの抽出においては、Cyanex 302 を用いたときの各重金属の抽出率の圧力依存性と水の添加効果を調べた。圧力の増加と共に抽出効率は増加した。抽出への水の影響は顕著であり、水の存在が錯形成に重要な働きをしているものと考えられる。また、各種キレート剤での抽出結果から、キレート剤により抽出選択性が異なることがわかった。

パラジウム触媒からのパラジウムの抽出において、1.5 MPa の条件下において、キレート剤として AA を用いた場合 30 分の抽出で 70%、60 分で 100% の抽出率が得られた。キレート非添加時に Pd は全く抽出されなかった。一方、抽出圧力の影響については、313 K、圧力 1.0 MPa 以上でほぼ完全に抽出が行われた。キレート剤に AA を使った場合、7-10 MPa 付近で抽出率が最大となった。Cyanex 302 を使った場合は圧力の増加と共に抽出率は増加した。これは圧力増加に伴い溶解度が増し、抽出反応が促進されたためと考える。次に、313 K、1.5 MPa において、反応時間の抽出率の影響を調べたところ、Cyanex302 では 30 分で 100%、AA では 30 分で 70% 以上に達しており、AA 及び Cyanex302 を用いたとき、抽出が迅速であることが明らかになった。キレート剤に TBP/HNO₃ を用いた時は時間経過により抽出率が緩やかに増加した。このことから Cyanex302 を用いると短時間で抽出が完了し、TBP/HNO₃ では抽出に時間を要することがわかった。この違いはキレート剤が超臨界二酸化炭素に溶解する時間およびパラジウムと錯体を作るときの錯体形成反応速度がキレート剤によって異なるためと考えられる。次に、抽出温度の影響を調べたところ、いずれのキレート剤を用いても温度の上昇に伴って抽出率が増加した。これは温度の上昇に伴い錯体の超臨界二酸化炭素に対する溶解度が高くなったことと、錯体形成反応速度の増加によると考えられる。

廃自動車触媒からの貴金属抽出においては、白金の抽出率は 20 - 30% であったが、抽出されることがわかった。抽出率が低く、ばらつく理由としては、触媒表面を不純物が覆っていることで抽出を阻害することによると考えられる。一方、パラジウムはどの条件においても抽出が行われなかった。これはキレート剤がパラジウムと錯形成されていないためであると考えられる。抽出時間の影響については 1.5 MPa において、抽出時間が長くなるに従って抽出率が増加していることより、抽出が比較的遅く、抽出時間の延長で更なる抽出率の増加が見込めると考えられる。CO₂ 流量の影響については、1.5 MPa において、CO₂ 流量の増加に伴い、抽出率の増加を得た。CO₂ 流量を変化させることにより更なる抽出率の増加が考えられる。また、キレート剤の連続供給がより完全な形で成されれば、抽出率は上がるものと考えられる。

結論 = 超臨界二酸化炭素中にキレート剤を溶解し重金属類と錯体を形成することで、抽出されることが

わかった。また、各種キレート剤に対して抽出性能を比較し、金属種とキレート剤による抽出選択性を明らかにできた。抽出方法ではキレート剤を連続供給することにより抽出率は上昇する結果を得た。更に抽出セルの選定、キレート剤の選定、原料とキレート剤の接触効率を上げるための工夫等により抽出率の向上が期待できると考える。

焼却飛灰、C C A 廃材、球状パラジウム触媒、ハニカム構造の廃自動車触媒のいずれにおいても重金属類を抽出することが可能であったが、抽出率については金属の種類により異なり、それぞれの系に対して最適なキレート剤の選定が重要であることがわかった。

研究課題名=埋立処分量削減を目的とした廃棄物処理残さの土木資材化と環境負荷低減化技術

研究期間(西暦)=2001-2004

代表研究者名=島岡 隆行(九州大学大学院)

共同研究者名=八木 美雄, 瀬戸 俊之, 南 亮太((財)廃棄物研究財団)

研究目的=本研究は、最終処分される廃棄物の約7割を占める一般廃棄物焼却残渣の埋立処分を回避させることを目的として、焼却残渣の有効利用とそれに伴う環境への負荷を最小限とするための技術開発および検討を行った。

研究方法=本研究は、以下の4つに大別される。

1. 収集システム変更に伴う焼却対象廃棄物および焼却残渣の性状変化に関する全国調査

焼却残渣を土木資材として有効利用するには、その性状を把握することが必要である。そこで、収集廃棄物および排出される焼却残渣の物理・化学的性状、各種リサイクル法(主として家電リサイクル法、容器包装リサイクル法、資源有効利用促進法)の施行に伴う、収集廃棄物および焼却残渣中のPb、Cdの溶出濃度、含有量を、全国の主要自治体・施設を対象にしたアンケート調査によって明らかにした。

2. 焼却残渣の環境安全な有効利用のための前処理技術の開発

(1) 焼却工場において発生する焼却残渣の化学性状の検討

焼却工場内における有害物質の挙動を把握することは、最終的に排出される焼却残渣中の有害物質量を制御可能かどうか判断する上で非常に重要である。そこで、収集人口50万人規模以上で、収集形態や産業構造が異なるF市とK市の2つの清掃工場を調査対象として、ごみおよび焼却残渣(焼却灰、ボイラー灰、エコノマイザ灰、減温塔灰、バグフィルター灰)中の重金属やダイオキシン等の含有量および溶出濃度を測定し、それぞれの性状の違いを検討するとともに、物質収支を評価した。

(2) 清掃工場における実排ガスを用いた焼却灰の炭酸化処理実験

焼却灰中の有害重金属(特にPb)の不溶化を低コスト、低エネルギーに行う前処理手法として、稼働中の清掃工場から発生する実排ガスを有効利用した炭酸化処理試験を行った。また、焼却灰を充填したカラム、および小型混練機を用い、様々な条件で炭酸化処理実験を行い、環告19号、46号、および底質調査法によるPb溶出濃度、含有量を検討し、炭酸化メカニズムの解明と、最適な処理条件を明らかにした。

(3) 土壌生成因子の付与による焼却残渣中の有害重金属不溶化技術の開発

土壌生成因子の作用によって、人工の火山灰ともいえる焼却残渣もまた、風化・安定化し、土壌に回帰すると考えられる。そこで、焼却残渣を異なる初期含水率、温度で乾燥させ、さらに、湿潤・乾燥を繰り返すことによって、重金属の不溶化に与える影響を評価した。

3. 焼却灰粒子の生成機構とその物理・化学的性状

焼却灰中の重金属溶出メカニズムを解明するためには、各種溶出試験によるマクロ的な指標に加え、焼却灰の単一粒子に着目したミクロ的な視点からの検討が必要である。そこで、焼却灰粒子の生成過程の整理、粒子内の重金属の存在分布、およびその存在形態等を、SEM-EDX、EPMA等の機器分析や逐次抽出法を用いて明らかにした。

4. 海面埋立用材としての焼却灰の有効利用に関する研究

高度な跡地利用を目的とした焼却灰の海面埋立技術開発のために、鉛直1次元カラムを用いた焼却灰の沈降実験を行い、沈降・堆積特性を評価した。また、廃止までに特に問題となる有機汚濁成分（TOC成分）の早期安定化について検討するため、凝集沈降時における海水へのTOC成分の溶出挙動と堆積した焼却灰からの溶出特性を、実験、および数値シミュレーションによって明らかにした。さらに、堆積層からのTOC成分の長期的な溶出特性を明らかにするため、大型一次元カラムを用いた実験によって検討した。

以上に加え、焼却灰有効利用の現状を広く把握することを目的として、国内外における研究・技術開発動向に関する文献調査を行った結果を示した。

結果と考察=本研究で得られた知見を以下に示す。

1. 収集システム変更に伴う焼却対象廃棄物および焼却残渣の性状変化に関する全国調査

重金属溶出試験結果より、Pbが約8割の施設において土壌環境基準を上回っていたことから、焼却灰の土木資材化には、Pbの溶出量の低減対策が必要であることが明らかとなった。また、各種リサイクル法の施行に伴い、収集（受入）形態に変更のあった焼却施設では、法施行前後で、Pb含有量は変化が認められなかったが、Cd含有量は49%減少していた。また、溶出濃度については、Pbが32%、Cdは99%減少していた。以上より、各種リサイクル法の施行に伴い、収集（受入）形態が変化することで焼却灰中のPb、Cd溶出濃度、含有量は、全体的に減少する傾向が認められた。

2. 焼却残渣の環境安全な有効利用のための前処理技術の開発

(1) 焼却工場において発生する焼却残渣の化学性状の検討

F市については、焼却された廃棄物中の灰分に対して92.6w-%の焼却灰と7.4w-%の飛灰（ボイラー灰2.4w-%、エコノマイザ灰0.2w-%、減温塔灰0.6w-%、バグフィルター灰4.2w-%）が発生していた。Cd、Pb、Zn、Fは60～70%が焼却灰に移行し、バグフィルター灰へは30～40%であった。焼却灰中のダイオキシン類は23～51pg-TEQ/gで土壌環境基準（1ng-TEQ/g）を下回っていたが、エコノマイザ灰、減温塔灰には150～600pg-TEQ/g検出され、焼却灰に比べ高濃度のダイオキシン類が認められた。

(2) 清掃工場における実排ガスを用いた焼却灰の炭酸化処理実験

本実験の炭酸化処理適正条件は、添加水分率：約5～10% / 乾灰、処理時間：約30～60分（4%炭酸ガス流量0.4m³/min）、装置入出口CO₂濃度：0～0.4vol%（0.4m³/min（炭酸ガス濃度：4%）×30～60分）、炭酸ガス吸収速度：0.305～0.356mL/min/g-乾灰であった。実排ガスを有効利用した本法は、低コストかつ低エネルギーで重金属を不溶化できる技術であることが示された。さらに、焼却灰を充填したカラム、および小型混練機を用い、様々な条件で炭酸化処理実験を行った結果、炭酸化処理によって環告46号法試験による土壌環境基準値（0.01mg/L）は満足した。しかし、環告19号法試験によるPb含有量は低下したが、150mg/kgを下回らなかった。

(3) 土壌生成因子の付与による焼却残渣中の有害重金属の不溶化技術の開発

焼却残渣に湿潤・乾燥操作を繰り返し与えた結果、Pbの溶出濃度は土壌環境基準値を下回る濃度にまで減少し、しかも室内に放置しておいた焼却残渣よりも速く不溶化した。また、含水率が10～30%の時に不溶化が最もよく進んだこと、窒素雰囲気でも不溶化したことから、Pbの不溶化は、溶解している共存物質が、乾燥による濃縮によって生成した沈殿物中に取り込まれる等の影響があることが示唆された。また、湿潤・乾燥工程によって不溶化した焼却残渣のpH依存性試験結果から、アルカリ性領域では不溶化が進行していたのに対して、酸性領域では再溶出しやすくなる特異な傾向を示した。

3. 焼却灰粒子の生成機構とその物理・化学的性状

焼却灰粒子にはガラス，金属類等が粒子内部に核として存在し，周囲を微細粒子が取巻くという特異的な構造を有していたことから，核となり得る不燃物の混入割合や溶融物等の生成程度が，焼却灰粒子の強度に大きな影響を及ぼすことが示唆された。また，焼却灰粒子を核の有無，種類により 8 種類に分類すると，溶融物を核とする粒子が全体の約半分，不燃物を核とする粒子が全体の約 2 割を占めていた。次に，湿潤状態の焼却灰に遠心力を作用させ，焼却灰が保有する水分を脱水した。その結果，脱水可能径 20 μm 以上の部分から，水溶性鉛の約 9 割が得られた。また，EPMA 分析結果より，焼却灰粒子中の鉛は，一様な濃度分布の中に，高濃度の微小領域（数十 μm 程度）が patch 状に存在していた。

4. 海面埋立用材としての焼却灰の有効利用に関する研究

焼却灰を海水中に投入すると，沈降する焼却灰は顕著な凝集性を示し，いち早く沈降した砂・礫からなる層（砂・礫層）の上にフロックが堆積し，浮泥層が形成された。焼却灰に含まれる無機塩類，重金属等の各層への移行割合を算出した結果，大部分の元素については，浮泥層の含有量と比較し，砂・礫層にその 10 倍程度多く含まれていた。また，焼却灰のフロック生成能については，pH10.2～10.6 の範囲で最もよく凝集した。

次に，小型水槽を用いて，浮泥層の有無による上部海水中の TOC 濃度を経時的に測定した。その結果，浮泥を有する堆積層において，砂・礫層内の濃度分布より算出した TOC 総溶出量に対する上部海水への総溶出量が約 53.5%であったことから，浮泥層は砂・礫層から溶出した TOC 成分を蓄積する傾向にあることが示唆された。したがって，廃棄物堆積層から浮泥層を除去することによって，海面埋立地の安定化が促進されることが考えられた。

結論=本研究によって，一般廃棄物焼却灰の土木資材への有効効利用と，それに伴う環境への負荷を最小限にするための技術開発へ向けて，多くの知見が得られた。廃棄物を「原料」と見なし，清掃工場は「骨材工場」，焼却灰は「製品（骨材）」とする一連の骨材製造フローとして，廃棄物の焼却処理を位置づけることが可能であることを示した。

研究課題名 = 廃アルミを原料として、水素、アルミン酸ナトリウム、アルミン酸カルシウム、水酸化アルミニウムなどを製造するプロセスの開発と、その評価のためのエクセルギー概念に基づくライフサイクルアセスメント (LCA) 手法の開発 に関する研究

研究期間 (西暦) = 2002-2004

代表研究者名 = 秋山 友宏 (大阪府立大学)

共同研究者名 = 久 正明 (大阪府立大学) 竹内 将人 (大阪府立大学) 古本 亜矢子 (大阪府立大学)

研究目的 = 廃棄アルミニウムから水素等を製造する技術開発：需要の大幅な増大が予測される燃料電池用水素の他、下水処理凝集剤用アルミン酸ナトリウム、合板建材の難燃材原料となりうる水酸化アルミニウムなどを、廃棄アルミニウムを原料として製造する技術を開発することにより、従来法に比べて安価かつ環境負荷の少ない製造法を提供する。

エクセルギー概念による、LCA 評価手法 (E-LCA) の開発：地球温暖化の進行に伴って、その対策、回避技術が多数提案、開発されている。これらの中から真に必要な技術を抽出しその育成を図っていくには、これら環境対策技術の評価手法の確立が重要である。これまでは炭酸ガス排出量や投入エネルギーの積算でライフサイクル評価が行われてきた。しかしながら、保存される「物質」や「エネルギー」の概念のみで評価する方法の限界が指摘されている。ここでは H14 年度に従来の LCA 手法で上記技術の評価するとともに、使えば減るエネルギーの概念である「エクセルギー」に着目して計算する方法を提案しその計算手法を開発する。H15 年度には実際に適用しエクセルギーによる LCA 的評価を試みる。

研究方法 = 廃棄アルミニウムから水素等を製造する技術の開発：

- 1) ビーカー実験により、十分な攪拌条件下で異なる温度、異なるアルカリ、異なるアルカリ濃度の操作条件下でアルミニウムと苛性ソーダ / 水酸化カルシウム水溶液を反応させ、その反応速度を発生水素から測定する。
- 2) 得られたデータから速度定数の温度依存性を明らかにする。
- 3) 同時に廃棄アルミニウムと水酸化ナトリウム / 水酸化カルシウム水溶液の反応に関して、熱および物質収支に基づく数学的モデルを開発する。
- 4) そのモデルの妥当性を検証すると同時に、実験室的規模の反応器の解析を行う。
- 5) 高圧水素発生の可能性を実験的に検討する。
- 6) H15 年度にはベンチスケール規模の装置を設計し実証試験を行う。

エクセルギー概念による、LCA 評価手法の開発：上記の廃棄アルミニウムから水素等を製造する技術を対象に、H14 年度は従来型の LCA 手法による炭酸ガス排出量およびエネルギー投入量解析を実施し、本技術の環境保全効果を評価する。H15 年度はエクセルギー解析による LCA 解析を実施し、従来型の LCA 結果と比較検討する。

- 1) 解析範囲の設定：関連資源の採掘を起点とし、水素 / 水酸化アルミニウム / アルミン酸ナトリウム製造工程や各物質の製造工程で使用する原材料およびエネルギーの製造工程を経て、残さが埋立処理され

るまでとした。ここで廃棄アルミニウムに関しては、それが潜在的にもつ環境負荷量をゼロと評価して解析を行った。

2) 比較検討対象プロセス：水素および水酸化アルミニウムを得るプロセスは以下のとおりとした。

(本技術) 廃棄アルミニウム(AI 分：15%) + 3H₂O → 1.5H₂ + Al(OH)₃ + 残さ

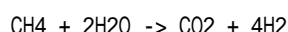
(従来技術) Al₂O₃ + 3H₂O → 2Al(OH)₃

水素およびアルミン酸ナトリウムを得るプロセスは以下のとおりとした。

(本技術) 廃棄アルミニウム(AI 分：15%) + NaOH+3H₂O→1.5H₂+NaAl(OH)₄+残さ

(従来技術) Al₂O₃ + 2NaOH + 3H₂O → 2NaAl(OH)₄

また、水素の従来製造法については、天然ガスクラッキング法を採用した。すなわち天然ガスを水蒸気改質し、その後シフト反応でCOから水素を得る。総括反応は以下で記述できる。



本技術および従来技術を比較する際の基礎単位(機能単位)は、「水素1キログラム製造時あたり」とした。なお本技術では、水素と同時に水酸化アルミニウムまたはアルミン酸ナトリウムが得られるのに対し、水素の従来製造法ではそれらは得られないため、LCA結果の単純な比較検討はできない。よって本研究では、水素従来製造法におけるCO₂排出およびエネルギー原単位に加え、本技術の副産物である水酸化アルミニウムまたはアルミン酸ナトリウムの従来製造法によるCO₂排出およびエネルギー原単位も併せて考慮することにより、両技術の比較検討を可能とした。

3) 解析時に採用した原単位について：上述の比較検討対象プロセスにて使用される、水素製造/水酸化アルミニウム製造/アルミン酸ナトリウム製造/水製造/残さ埋立の各工程に関するエネルギー消費および炭酸ガス排出原単位に関して、現在入手可能なLCAソフトウェアや文献などから調査収集を実施した。なお採用したデータは、主としてヨーロッパ由来の積み上げ法で作成した値を使用した。

4) 上記の廃棄アルミニウムから水素等を製造する技術を対象に、LCAで解析したのと同じ系を想定しエクセルギー解析を実施し従来法と比較検討する。

結果と考察 = アルミニウムから水素等を製造する技術の開発：

1) ビーカー実験の結果、急激な水温の上昇、PHの低下、および高純度水素の発生を確認した。生成物はPHと温度を制御することにより、高純度水酸化アルミニウムとして晶析回収することができ、このとき水酸化ナトリウムは循環使用が可能であった。また得られた水溶液を乾燥固化するとアルミン酸ナトリウムを得ることができた。

2) 13回の実験データを整理すると、温度依存性を考慮した次のアレニウス型の反応速度定数で整理できた。

$$k_s = k_{s0} \exp(70500/RT)$$

3) これらの現象解析に未反応核モデルを適用し、アルミニウムは同心球的に反応し、この発熱反応の熱は水溶液の温度上昇を導くと仮定した数学的モデルを開発した。

4) このモデルで濃度および水溶液温度が大幅に変化する実験データの説明を試みたところ、計算値と実験値はほぼ一致した。これによって、開発したモデルの妥当性が検証された。さらに実験室的規模の装置における実験データと計算値の比較を行ったところ、測定した温度上昇および水素発生速度はいずれも計算値に比べ遅かった。この事実は実験室的規模の装置においては攪拌が十分でなく、アルミニウム周りの境界膜抵抗律速が無視できないことを意味した。換言すると水素製造能力を向上させるためには装置の攪拌強度を向上させる必要があることを明らかにした。

5) NaOH および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のいずれのアルカリを使用した反応系においても $\text{Al}(\text{OH})_3$ を晶析させることにより



で総括反応を記述でき、アルカリ循環できることが判明した。

6) NaOH は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に比べ 2 から 3 桁大きい反応速度定数を有し、NaOH を用いるほうが水素発生には効率的であった。また速度定数の温度依存性は次式で記述できた。

$$k_s = k_0 \exp(35024/RT) \quad \text{for } \text{Ca}(\text{OH})_2$$

7) オートクレーブ装置による NaOH 処理では、1MPa を越す高圧水素の発生が可能であることを明らかにした。この事実は今後下流に水素吸蔵合金を設置することにより水素の精製・貯蔵が可能であることを示唆した。

8) ベンチスケール装置（内容積 300ml、設計圧力 40MPa、設計温度 300 ）を中心とする水素発生装置を設計・製作した。圧力制御は、水及びアルカリ溶液の送液により行う方式を採用し、安定して 30MP の高圧水素を連続製造できるシステムの実証を完了した。

エクセルギー概念による、LCA 評価手法の開発：

従来の LCA 手法で上記技術を解析評価した結果、以下のことが明らかとなった。水酸化アルミニウムが副産物となる製造プロセスに関しては、従来技術では使用しているボーキサイトを本技術では使用していないこと、および従来法の水素製造プロセスにおけるエネルギー消費および炭酸ガス排出が本技術では回避される効果により、環境負荷量の大幅な削減が可能である。例えば CO_2 排出量に関しては、従来法では約 16.5kg に対し本技術では約 0.7kg（4.2%相当）エネルギー投入量に関しては従来法では約 420MJ に対し本技術では約 8MJ（1.9%相当）となった。アルミン酸ナトリウムが副産物となる製造プロセスに関しても、従来法の水素製造プロセスによるエネルギー消費および炭酸ガス排出が本技術では回避される効果により、環境負荷量の削減が可能であった。例えば CO_2 排出量に関しては、従来法では約 25.3kg に対し本技術では約 15.4kg（60.9%相当）エネルギー投入量に関しては従来法では約 430MJ に対し本技術では約 260MJ（60.5%相当）であった。

ELCA 解析結果は以下のことを明らかにした。

(1) 水素および $\text{Al}(\text{OH})_3$ の製造プロセス（ケース A）に関しては、本提案プロセスについてのエクセルギー損失量（EXL）は 150.3MJ、またエクセルギーの有効利用率は 44.4%に達し、比較（従来）プロセスに比してエクセルギー損失を 96.8MJ 抑え、その結果有効利用率を 11.7%増大させることに寄与していることが明らかになった。上記エクセルギー損失低減量のうち、天然ガスの水蒸気改質法による水素製造の回避量で 60.2MJ を占めており、従来プロセスによらず水素製造が可能となった本提案プロセスの優位性が明らかとなった。

(2) 水素および $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ の製造プロセス（ケース B）に関しては、本提案プロセスについてのエクセルギー損失量（EXL）は 558.4MJ、またエクセルギーの有効利用率は 28.2%に達し、比較（従来）プロセスに比してエクセルギー損失を 96.8MJ 抑え、その結果有効利用率を 3.2%増大させることに寄与していることが明らかになった。エクセルギー損失量の抑制量はケース A の場合と同量であったが、ケース B にて使用される NaOH 製造時におけるエクセルギー損失量が大きく影響し、ライフサイクルからの視点によるエクセルギー有効利用率の向上はケース A よりも小さいものとなった。

(3) 以上で得られた E-LCA 解析結果を、昨年度実施の従来型 LCA 解析結果と比較検討したところ、当該物質のおかれた環境系により一律に決定されるエクセルギー値（E-LCA 手法）は、特にリサイクル品を解析す

る際に、そのリサイクル原料がたどった複雑な経路を考慮する必要がなく、リサイクル評価に対してより現実に即した解析結果が得られる可能性を示した。

結 論 =

- 1) ピーカーレベル、および実験室的規模の実験により水素など有価物回収の基礎的知見を得ると同時に、得られたデータに基づいて数学的モデルを開発した。
- 2) 廃棄アルミニウムを原料に 30MPa もの高圧水素が発生するベンチプラントの製作に成功した。今後は水素吸蔵合金を用いることにより発生した水素の精製・貯蔵が可能となる。
- 3) 従来型 LCA 解析を実施した結果、本技術は水素および水酸化アルミニウムの従来製造プロセスと比較し、エネルギー投入量および炭酸ガスの発生が 2-4%程度に激減することなどを明らかにし、本技術が環境負荷の低いものであることを定量的に明らかにした。

エクセルギーによる LCA 解析結果は、提案する本技術は従来法に比べ大幅に環境負荷が低いことを定量的に明らかにした。さらにこの方法は従来の LCA 法の欠点であるリサイクル回数を一切考慮する必要がないことが優れた利点として挙げられる。

研究課題名・研究番号=リサイクルにより劣化した古紙パルプ繊維のナノ粒子化による新規資源循環システム構築に関する研究

研究期間(西暦)=2002-2004

代表研究者名=野村春治(京都工芸繊維大学・アイランド工業株式会社)

共同研究者名=岡山隆之(東京農工大学)、小名俊博(九州大学)、山口和三(和歌山県工業技術センター)、島田勝広(東京都立産業技術研究所)、加藤直樹(株式会社ニート)、大町敏雄(アイランド工業株式会社)

研究目的=日本国内の古紙の回収量は約1,650万トン/年と非常にリサイクルが進んでいる。しかしながら、再生紙生産工程から排出される、リサイクルにより劣化し、短小化した古紙パルプ繊維は、回収された古紙の30%、約500万トン/年に上る。一部はパルプモールド等で再利用されているが大部分は焼却されている。これを微粉碎ナノ粒子化し、新規な機能性材料として再生利用する資源循環システムを構築することが本研究の主目的となる。ナノ粒子を作成すること、並びにその特徴を生かした製品、例えば熱成型による生分解性透明複合樹脂材料を試作することが具体的な目標となる。ここで、古紙の主成分であるセルロースは、粉碎しても水素結合により直ちに再凝集しナノ粒子化が困難であるため、再凝集を阻止する方法について検討する。この際、ナノ粒子径を非破壊でリアルタイム測定するラマン分光システムを新規開発し、粉碎装置に付加することにより生成する粒子径をオンライン制御することを第二の目的とする。この結果、大気中への二酸化炭素の放出が大幅に削減されることが見込まれることから、地球の温暖化防止に貢献することが最終目的である。

研究方法=第一に、古紙パルプの微粉碎ナノ粒子化であるが、初期微粉碎化処理としての乾式粉碎を行う。古紙の主成分であるセルロースは、微粉碎しても水素結合により直ちに再結合しナノ粒子化が困難であるため、再結合を阻止する方法、例えば、超臨界二酸化炭素雰囲気下での超音波粉碎などについて検討する。

第二に、ナノ粒子径を非破壊でリアルタイム測定する装置であるが、まず粉碎中のスラリーを非破壊的にラマン分光法を用い粒子径を計測する手法を検討する。この際、多変量解析などを利用した新しいアルゴリズムを開発する。次に、これを含むソフトウェア、装置を開発した後、攪拌などによる粒子の流れに左右されない、リアルタイムで計測可能なアルゴリズムへと発展させる。

最後に応用であるが、生分解性ポリ乳酸樹脂との複合化についても検討する。これは、ナノ粒子化古紙パルプとの複合化による完全生分解性透明複合樹脂材料の開発となる。当然、複合材料としての成形加工技術の開発についても詳細に検討する必要がある。

これらの技術開発により、劣化古紙パルプの新規再生用途を開発し、新規資源循環システムを構築する。

結果と考察=

1. ナノ微粒子化: まづ、紙パルプのナノ微粒子化破碎に先立ち、ボールミルなどを用いた各種乾式の破碎実験を実施した結果、遊星型ボールミルによる粉碎が最適であることが示された。新聞紙ならびに紙を試料として、遊星型ボールミルを用いて粉碎処理の最適条件下では、最小約150nmで平均

約400nmのナノ粒子群が確認され、また、粒径約2.5μmの粒子群と1μmを境にして明確な粒度分布の分離が確認された。このことは、1μmを境界条件とした分離操作によりナノ微粒子の分別ができることを意味している。この分離操作については、予備実験において可能であることが示されているが、再現性を含めた再確認が必要であるため、ここでは言及しない。また、超臨界二酸化炭素雰囲気下での超音波処理については、ナノオーダーまでの微粒子化は出来なかったが、超臨界流体下での攪拌操作と超音波照射の効果が証明され、超臨界・超音波装置の有効性が実証された。

2. 粒子径オンライン計測手段：2種類のラマン分光光度計を用いて「オンライン非破壊粒子径計測が可能か」を検討した。すなわち、Nd;YAG(波長:1064nm)を励起レーザーとして用いたFT-ラマン分光光度計では水溶液中のポリスチレンナノ粒子の直径が非破壊的に定量可能であることが、世界で初めて実証され、学術的に有益な結果を得た。しかしながら、FT-ラマン分光光度計はオンライン計測には使用不可能であるので、波長785nmレーザーを用いた分散型ラマン分光光度計による粒子径計測実験を実施した。本装置は蛍光の影響を強く受け、種々蛍光除去を試みたが、蛍光の除去は不可能で、単純に粒子直径との相関は得られなかった。
3. 新規用途開発の検討：ナノ微粒子化紙パルプが成形加工に必要な量を調製出来なかったため、古新聞粉砕化物ならびに棒状微結晶セルロース粒子を用いて環境にやさしい生分解性プラスチックであるポリ乳酸との複合樹脂について、その成形加工性とそれらの物性について検討した。古新聞粉砕化物との複合樹脂は、樹脂本体の物性より若干低下するが、古紙パルプは約50%まで添加することができる。また、微結晶セルロースとの複合樹脂では、引っ張りならびに曲げ力学特性については、共に、弾性率はセルロースの含有率が高くなれば高くなり、降伏点の応力はセルロースの含有率が高くなれば、逆に低くなる。

結論=

1. 微粒子化技術：新聞紙ならびにろ紙の微粉碎実験の結果、最適条件下では、最小約150nmで平均約400nmのナノ粒子群が確認され、粒径約2.5μmの粒子群と1μmを境にして明確な粒度分布の分離が確認された。このことは、1μmを境界条件とした分離操作によりナノ微粒子の分別ができることを意味している。すなわち、ナノ粒子化に関する項目については、目的の90%は達成されたものと考えられる。
2. ナノ粒子径非破壊オンライン計測技術：モデル物質であるポリスチレンナノ粒子に関しては、定量可能であることが実証できた。785nmレーザーを励起光源に用いたオンライン用装置では、蛍光の影響が強く、蛍光を除去する装置は方法の開発が必要であることが判った。
3. リユース用途開発：環境に優しい新規な古紙パルプ-生分解性樹脂(ポリ乳酸)複合樹脂材料の開発に関する研究より、複合樹脂は、樹脂本体の物性より若干低下するが、古紙パルプは約50%まで添加することができる。しかしながら、ナノ微粒子化紙パルプが成形加工に必要な量を調製出来なかったため、当初の目標である透明性複合樹脂は得られなかった。微結晶セルロースを複合化すれば、微粒子の特性である充填効果により硬さとしての弾性率は向上するが、破断強度や破断伸びは低下した。これらを改良するには、(1)微結晶セルロースの表面改質、(2)押出機のスクリー構成や押出条件が混練に及ぼす影響(特にL/Dや形状)等の研究が必要となる。以上の結果より、生分解性透明複合樹脂開発に関する基盤技術が開発できた。上記ナノ微粒子化の結果を考慮すると、透明な環境に優しい新規な古紙パルプ-生分解性樹脂(ポリ乳酸)複合材料の開発が可能であることが示されたことになり、本項目の達成度は90%と考える。

研究課題名・研究番号=耐久財起源の循環資源の適正管理に関する研究

研究期間（西暦）=2001-2004

代表研究者名=森口祐一（国立環境研究所）

共同研究者名=寺園淳、橋本征二、田崎智宏（国立環境研究所）、柳下正治（名古屋大学）、谷川寛樹（和歌山大学）、加河茂美（現東北大学、元国立環境研究所）

研究目的=既に建設解体廃棄物や耐久消費財は、廃棄物発生量に大きな割合を占めているが、今後、使い捨て型の廃棄物の減量化が見込まれること、社会が成熟し、過去からのストックが更新の時期を迎えることを考慮すれば、耐久財起源の循環資源は、重要度を増すと考えられる。そこで本研究は、こうした耐久財起源の循環資源に焦点をあて、今後の発生量を予測し、そこに含まれる物質の有用性・有害性などの質的側面を評価するとともに、リサイクル・適正処理処分促進のための技術や施策等の管理手法とその効果について検討することにより、循環型社会形成に資する知見を提供することを目的とする。

研究方法=従来型の貨幣表記の産業連関システムと物量的産業連関システムを連動させることにより、財に内包化される原材料必要量・廃棄物発生量を実証データに基づいて分析し、耐久財問題への適用を行った。また、上記産業連関モデルならびに自動車の廃棄モデルを用いて、乗用車の長期使用が環境と経済へどのような影響を与えるのかを定量的に分析した。

自動車・家電製品を対象とした事例研究では、乗用車に用いられる各種素材の時系列的なマテリアルフローを推算した。また、家電製品の循環・廃棄フロー調査手法として使用年数分布の調査方法を開発するとともに、家電リサイクル法施行前後における廃棄フローの変化・実態を調査・解析し、法施行による影響を考察した。

耐久財の廃棄・保有（修理・修繕、リユース）行動に及ぼす要因分析では、家電製品と自動車については、一般消費者の過去の廃棄行動ならびに今後の予定廃棄行動についてアンケート調査を行って、廃棄行動・長期使用行動等に及ぼす各種要因を保有状況と廃棄状況の両面から解析した。民家については、民家の再生を実施した施主を対象にヒアリングを行い、再生の意思決定に影響を与える因子を抽出した。

建築物・土木構造物の国・地域ブロックレベルでの検討では、主要建材のマテリアルフローを2030年まで推計するとともに、関連するリサイクル技術の動向を整理し、今後の長期的管理の課題を検討した。都市・地域レベルでの検討では、地理情報システム(GIS)を用いた住宅団地規模の詳細なマテリアルフロー分析を行うとともに、建設・維持更新時の資材投入原単位から各種都市構造物への物質投入量と蓄積量を推計した。さらに、2020年までの短期予測とシステムダイナミックスを用いた2100年までの長期予測を行い、建設に係る都市マテリアルバランスの検討を行った。また、建築物などの長寿命化に向けた参考情報を得るため、建設廃棄物の発生実態に関する日本と欧州主要国との比較分析を行った。

法制度の検討では、世代間公平の考え方の下に長期的な耐久財の適正管理を可能とする法制度のあり方を検討するため、廃棄物・リサイクルに係る法制度の変遷と循環型社会の実現の観点から見た各法制度に係る課題研究、ならびに放射性廃棄物管理等の類似分野における法制度研究を実施した。また、廃

棄物の減量・リサイクルを短期間のうちに達成した名古屋市を例に、法施策の徹底等による廃棄物排出量/マテリアルフローの変化、環境負荷量の変化等に関する分析を行い、政策効果の事例研究を行った。これらの知見を踏まえ、人口減少基調の我が国において将来の大量発生が予測される建築物等の耐久財起源の循環資源の適正管理のための新たな法制度の必要性・可能性等の検討・提案を行った。

結果と考察=産業連関モデルならびに自動車の廃棄モデルを用いて乗用車の長期使用がもたらす環境と経済への影響を分析した結果、長期使用による買替需要低下が経済にかなりの影響を与えるが、長期使用に付随する家計消費の減少が乗用車購入以外の消費や貯蓄・投資へ向かった場合の二次的影響を分析すると、買い替え期間の0.2年延長がGDPを押し上げる一方で、産業廃棄物発生量を低減させるシナリオが存在することを示した。

自動車・家電製品を対象とした事例研究では、乗用車に用いられる各種素材の時系列的なマテリアルフローを2020年まで推算した結果、アルミとPP、その他プラ(PEとABSを除く)の廃棄が今後増加すること、リサイクルフローの素材数は少ない一方で処理処分フローの素材数は多いこと等が示された。家電リサイクル法施行の影響解析では、法施行直前の駆込廃棄は主に古い製品の廃棄によること、リサイクル費用徴収により発生抑制が進む可能性は認められなかったこと、法施行後の排出家電全体のフローのうち法がカバーしているのは約4~5割であり、使用済み家電全体の包括的評価が求められることを示した。

耐久財の廃棄、修理・修繕、リユース行動に及ぼす要因分析の結果、車の廃棄・買替には車の変更意思と車検時期が主要因であること、家電等では故障が廃棄の主要因であること、家電等の修理・リユース意識が高くないだけでなく意識が高い人でもこれらの行動を断念せざるを得ない状況があること、家電等のリユースが必ずしも製品使用年数を長くさせるわけではないことが示された。民家の再生については、民家再生の意思決定に影響を与える9つの因子が抽出され、特に心理的な側面、情報の側面が重要であると考えられた。

建築物・土木構造物の国・地域ブロックレベルの検討では、主要建材のマテリアルバランスから社会蓄積量の全てが廃棄物になるわけではないことが示された。また、将来推計結果、2030年頃にはコンクリート塊の需給バランスが問題となりうること、処理時に注意を要する建材の適切な管理が重要であることを指摘した。都市・地域ブロックレベルの検討では、GISを用いた詳細なマテリアルバランスを定量化することで、地域内の将来における建設廃棄物発生量および面的分布を明らかにできた。九州市における建設に係るフロー予測結果からは、2020年に現在の再生利用目標値を達成するには158万トンもの建設副産物の再生と利用確保が必要なことが示された。また、建設廃棄物発生実態の国際比較結果からは、重量ベースの一人あたり建設廃棄物発生量は日本と英独仏とで大差はないが床面積で比較すると日本の建築・解体のサイクルが速いこと、混合廃棄物の割合が大きいこと、欧州のような建築物維持保全型取組が必要なこと等が明らかになった。

法制度の検討では、関連制度のレビューをもとに、我が国に循環や循環型社会の概念が環境政策に導入された経緯を考察した上で、循環関連諸法の導入の背景を分析し、容器包装リサイクル法及び家電リサイクル法を取り上げ拡大生産者責任(EPR)が循環型社会形成上の重要な政策課題として登場した背景と課題を示した。名古屋市における政策効果の事例研究では、施策実施前後での廃棄物排出量/マテリアルフロー/環境負荷量の定量的・定性的な変化等を求め、全ての面で環境保全効果を発揮したことを明らかにした。さらに、長期的視野に立った建築物等の適正管理に向けて、既存リサイクル諸法、放射性廃棄物の管理に関する法制度をはじめとする関連分野の法制度研究を実施した結果、既存諸法では長

期的に見通される構造的問題を解決することは困難であるとの結論に至り、建築物等に対する EPR の導入や長期的な拠出金制度の新設等の新たな制度設計の必要性を指摘した。

結論=産業連関分析、マテリアルフロー分析、保有・廃棄モデル、意識・行動調査などの手法と、自動車・家電などの耐久消費財、建築物・都市インフラ、注目すべき地域といった事例研究対象とを組み合わせた研究を行い、耐久財に起因する廃棄物の発生と循環利用に関する分析手法を提示するとともに、これらが将来予測を含めた現状分析や、今後の問題点の検討に有効であることを示した。また、耐久財起源の循環資源の適正な管理のための政策提言に向けて、法制度面での課題を指摘した。

研究課題名 = 新燃焼方式によるダイオキシンフリーの小型焼却炉の開発

研究期間 (西暦) = 2001-2004

代表研究者名 = 武政 剛弘 (長崎大学)

共同研究者名 = 茂地 徹 (長崎大学) 高尾 雄二 (長崎大学) 石橋 康弘 (長崎大学)
田平 泰広 (長崎大学) 長田 純夫 (福岡大学) 大久博道 (福岡大学)

研究目的 = ダイオキシン類等の微量有機物質は燃焼過程、熱回収、ガス冷却過程及び排ガス処理過程において、不完全燃焼生成物の塩素化によって発生すると考えられている。従って、焼却処理におけるダイオキシン類の抑制に際し、まず考えるべき事は「完全燃焼」である。大型炉での完全燃焼技術は幾つかあるが、小型炉で完全燃焼する技術の確立はまだない。

小型焼却炉で完全燃焼を達成する方法として、連続投入と水蒸気噴射の方式に新たに取り付けた拡散ノズルによる炉内での排ガス攪拌効果を組み合わせた新燃焼方式を考案した。この新燃焼方式を確立した後、廃棄物を完全燃焼させるための諸条件及び仕様を決定し、ダイオキシンフリー小型焼却炉の開発を目的とした。

研究方法 = ダイオキシン類等の発生メカニズムは不完全燃焼生成物の塩素化に依るものと考えられている。従って、ダイオキシン類発生の抑制手段としては完全燃焼を行なうことが必要となってくる。平成 15 年度の試作炉は、平成 13、14 年度の試作焼却炉の欠点を解消し、炉の上部と下部に設置した送風機の空気量をインパクタによって調整した。さらに、新たに設置した攪拌ノズルによって、排ガスの十分な攪拌を行なった。試作炉の構造は平成 13、14 年度と同様に炉壁を二重構造にして、廃棄物を一次燃焼室 (炉の下部) で燃焼させ、二次燃焼室 (炉の上部) に設置した二基のバーナーで完全に熱分解ガスを燃焼させる方式を採用した。

炉内の構造は上述のように、残渣流動分解室、一次燃焼室、二次燃焼室で構成されている。二次燃焼室内には LPG ガスバーナーが二基設置されており、燃焼中は常時点火している。二次燃焼室内筒と外筒の間に循環水冷パイプを設置して内筒壁の冷却を行ない、その熱を吸収して循環水冷パイプ内の水温が上昇すると水蒸気が発生し、それを二次燃焼室下部から炉内に噴射できるようにしている。送風機は内筒と外筒の間に送風をして、炉床から炉内に空気を送り込む構造になっており、同時に内筒壁の冷却を行なっている。平成 15 年度の研究も過去 2 年間と同様に、空気供給量と水供給量を調整し、炉内温度の経時変化と被燃焼物質の相互関係等を精査した。さらに、最終年度の実験では、新しく設置した攪拌ノズルと送風機 2 機による燃焼ガスの混合及び焼却炉内筒の冷却効果について検討した。

結果と考察 = 空気供給量、空気供給位置をそれぞれ可変できる 2 重円筒構造の小型燃焼実験炉を製作し、炉内温度分布、炉内ガス流速分布、被燃焼物質との相互関係等について精査するための送風試験の結果、旋回流が生成されていることがわかった。このことは火炎が炉の中央部に集中すること、すなわち、火炎が炉壁から離れることを示唆するものである。木材を廃棄物として行った燃焼実験を行った結果、着火から 1 分以内に炉内温度が 1000 以上に達し、安定燃焼することがわかった。しかし、燃焼初期の灯油燃焼による HC、CO の発生、燃焼後期の CO の発生に対する改善策が必要である。焼却後の残渣は灰分のみであり、それに含まれるダイオキシン類の濃

度は検出限界値以下であった。この結果は、焼却炉内でほぼ完全燃焼していることを立証するものである。水蒸気注入による燃焼促進効果に関する明確な結果は得られていないが、その傾向は確認されている。また、水蒸気注入効果を吟味するために、ゴミをメタンに置き換えた数値解析を行った。その結果、燃焼に対する着火時間及び反応時間の短縮が確認された。

空気注入口の追加及び送風機 2 機の設置により、CO、HC 共に大幅に減少した。しかし、点火直後及び熾き火燃焼域における CO、HC の高濃度の検出がみられる。これは、1 次及び 2 次燃焼空気配分、ガスの攪拌に起因するものと推測されるが、CO、HC 濃度とガス温度は可逆の関係にあり、測定結果においても燃焼温度が高温となっている領域では CO、HC ともに濃度が低下している。熾き火及び 2 次空気ガス攪拌用ノズルと多目的な利用を考えている送風機にインバータを追設して、風量を微調整することにより、1 次燃焼及び熾き火燃焼が良好となり、適正風量の再調整によって、CO、HC の減少が確認できた。さらに、1 次燃焼及び熾き火燃焼時に炭化水素系ガス（試験にはプロパンガスを使用）を用いて補完燃焼させることにより、更なる減少が見られた。炉本体の温度（メタル温度）については、200 以下となっており、冷却空気の十分な冷却効果があることが示された。炉本体（内筒）に使用している材料は SUS304 であり、耐熱温度が約 600 である。このことから、SUS304 の本焼却炉への利用が十分に可能であると考えられる。しかし、焼却炉最下部（廃棄物投入口近辺）の燃焼域は、高温になること及び空気攪拌の制御が難しいことから、炉本体（内筒）に火炎が接触し、SUS304 の耐熱温度である 600 以上となることが懸念される。そこで、炉本体の焼却炉最下部（廃棄物投入口近辺）には耐火煉瓦の設置が必要であると考えられる。

結論 = 3 年間の実験で得られた結論は以下のとおりである。

平成 13 年度の達成目標は、空気供給量、空気供給位置をそれぞれ可変できる 2 重円筒構造の小型燃焼実験炉を製作し、炉内温度分布、炉内ガス流速分布、被燃焼物質との相互関係等を精査することを目標とした。その結果、上述した項目について定量的な結果を得るとともに、炉内で旋回流が発生しており、炉内温度を 1100 程度に維持でき、燃焼に対する水蒸気注入効果が存在することを明らかにした。

平成 14 年度の達成目標は、燃焼初期と燃焼終了時（熾火燃焼時）の不完全燃焼に対する対策と水蒸気点火効果についての検討することを目指した。その結果、熾き火・2 次空気ガス攪拌用ノズルの設置及び炭化水素系ガスを用いた補完燃焼が、燃焼初期と燃焼終了時（熾火燃焼時）の不完全燃焼に対する有効な対策であることが示され、ダイオキシン類の基準値を十分にクリアーできる状況まで炉の開発は進捗した。

最終年度である平成 15 年度の達成目標は、燃焼物の違いによる排ガス成分の状況やバッチ方式の欠点である燃焼初期と燃焼終了時（熾火燃焼時）の不完全燃焼を防止するための制御方法等の再検討により、完全型のダイオキシンフリーの小型焼却炉を完成させることとした。その結果、廃木材専焼及び廃木材と廃プラスチック混合の焼却では安定な燃焼が可能であることが示されたが、廃プラスチック専焼は炉内温度が 1000 ~ 1200 に上昇するために、炉内内部壁の熱歪みが発生する危険性があることがわかった。また、LPG ガスの使用により、CO、HC の未燃炭化物の発生抑制ができ、水蒸気噴射によって、サ - マル NOx の発生を抑えることが可能になった。

平成 15 年度に試作した連続投入式小型焼却炉は、流動分解ガス温度、一次燃焼ガス温度共に 800 以上を保持しており、構造基準を満足しているが、今後は市販炉として素人でも簡単に操作できるように改造が必要である。