

平成10年度厚生科学研究補助金（生活安全総合研究事業）  
研究成果報告書

**廃棄物ライフサイクルにおける有害化学物質の  
リスクアセスメント手法の開発に関する研究**

平成11年4月10日

主任研究者

国立公衆衛生院廃棄物工学部

部長 田中 勝

研究課題名 : 廃棄物ライフサイクルにおける有害化学物質のリスクアセスメント手法の開発に関する研究

研究費の名称 : 厚生科学研究費

研究事業名 : 厚生科学特別研究事業

国庫補助金精算所要額 : 10,000,000 円

研究期間 : 1年間(1998)

主任研究者名 : 田中 勝 (国立公衆衛生院廃棄物工学部部長)

分担研究者名 : 井上雄三 (国立公衆衛生院廃棄物工学部室長)  
山田正人 (国立公衆衛生院廃棄物工学部主任研究官)  
市川 勇 (国立公衆衛生院労働衛生学部室長)  
木苗直秀 (静岡県立大学食品栄養科学部教授)  
小野芳朗 (岡山大学環境理工学部助教授)  
吉野秀吉 (神奈川県環境化学センター研究員)

研究補助者名 : 小野雄策 (埼玉県公害センター産業廃棄物課課長)  
貴田晶子 (広島県保健環境センター生活環境部室長)  
野馬幸生 (広島県保健環境センター生活環境部研究員)  
原 雄 (千葉県産業廃棄物研究センター課長)  
滝 義忠 (三菱化学(株)環境安全本部地球環境部次長)  
坂本茂實 (日本 IBM(株)開発製造本部環境保全コーディネーター)  
沢田興三 (関西ペイント(株)技術本部部長)  
横山 宏 ((株)日立製作所環境本部地球環境推進センター長)  
水野 繕 (NEC(株)環境管理部環境技術シニアマネージャー)

厚生科学研究補助金（生活安全総合研究事業）  
総括研究報告書

廃棄物ライフサイクルにおける有害化学物質のリスクアセスメント手法の開発に関する研究

主任研究者 田中 勝 国立公衆衛生院廃棄物工学部長

研究要旨：製品段階で鉛の96%のフローを明らかにし、使用・廃棄・処理・処分における鉛の分配（蓄積）状態及び環境への移行量を推定する基礎データを得た。また、環境移行モデルを用いたサブスタンスフローモデルを用いて、資源～最終処分に至る全コンパートメント及び環境（気圏・土壌圏・水圏）の鉛の蓄積を推定し、本モデルが有害化学物質管理のツールとして利用できることを明らかにした。一方、種々の遺伝子毒性試験法の比較によって適切な陽性対象物質を明らかにし、廃棄物分野へ応用するための本法のプロトコル化を示した。また、浸出水及び焼却灰や飛灰への適用から各種試験の応答特性を明らかにするとともに特定物質の存在も明らかにすることができ、スクリーニング法として本法が廃棄物分野に適用可能であることを示した。

分担研究者氏名・所属施設名及び所属施設における職名

井上雄三・国立公衆衛生院 室長  
山田正人・国立公衆衛生院 主任研究官  
市川 勇・国立公衆衛生院 室長  
木苗直秀・静岡県立大学 教授  
小野芳朗・岡山大学 助教授  
吉野秀吉・神奈川県環境科学センター 研究員

#### A. 研究目的

有害な化学物質が、私たちの生活の中で便利さと共に家庭生活或いは地域社会の中まで入り込み、それが廃棄物ライフサイクル中で環境中に移行し、環境・健康リスクを増大させるという事態を起こしている。このような人-環境系物質代謝サイクル上の化学物質の動態と健康リスクに係る問題は非常に複雑であるから、廃棄物ライフサイクルにおける有害物質の環境中への移行を物質代謝サイクルにおける動態として捉え、リスクアセスメントを行うことによって製品への使用の規制をも含めた総合的な管理システムを構築することが重要な課題である。廃棄物ライフサイクルから排出される有害物質には、例えば、製品等にもともと含有されるプラスチックの可塑剤、重金属等の物質、または、焼却処理や排水処理過程から二次生成される有機ハロゲン化合物等、多様な物質があり、これら全てに個別に対応していくことは必ずしも現

実的ではない。また、これら有害物質の排出実態は、将来的なシステムの変更により大きく変化する可能性がある。したがって、その対策および制御には、これらの物質の物質収支モデル及び定量的なリスクアセスメントを用いたより包括的かつシステムチェックなアプローチが必要となる。本研究においては廃棄物ライフサイクルにおけるマテリアルフローより有害物質の排出量を予測するモデル、および排出された有害物質を包括的に評価するバイオアッセイ法の開発を行ってきた。

本研究プロジェクトでは、これらの手法のより個別的な事例への適用を通して、より広範かつ精密な廃棄物ライフサイクルのリスクアセスメントによる評価手法を確立することを目的として、（1）人-環境系物質代謝サイクルにおける有害物質の人および生態系への作用量の解明、（2）有害物質の毒性評価手法の開発及び（3）有害物質に対する総合的リスクアセスメントの手法の開発、に関する研究を推進する。本研究を遂行することによって得られる成果は、廃棄物処理・処分施設に対する住民の理解を得るための客観的な情報として役立ち、廃棄物に関する行政施策を将来に向けて積極的に展開することが期待できるので、本研究の社会的意義は極めて大きいものと考えられる。

## B. 研究方法

### 1. 人-環境物質代謝サイクルにおける有害物質の人および生態系への作用量の解明

#### 1-1 我が国における鉛に対するマテリアルフローの作成

調査対象年度は平成7年(1995年)度とした。資源・原材料・部品については、統計年報と関係者へのヒアリングによりデータを収集した。製品における鉛使用のデータは、主に関係者へのヒアリングにより収集した。製品における年間の鉛使用量は、製品1個当たりの鉛含有量を調査し、これに年間生産量を乗じて求めた。電化製品や自動車のような多くの部品から構成される製品については、鉛使用部品と部品中の鉛含有量を把握し、総和して製品1個当たりの鉛含有量とした。

#### 1-2 鉛の環境移行の解析

物質の移動速度フラックスを数式化し、これを用いたサブスタンスフローアナリシスにより鉛の環境移行モデル解析を行った。まず、(1)で得られたマテリアルフローよりサブスタンスフローモデルを作成した。モデルは、生産過程、生活系及び産業系消費過程(輸出も含む)、廃棄物処理過程が主フローとなる7過程、全24個のプロセスから構成されている。また、これら生産過程及び消費過程からの流出は選別過程を経てリサイクル及び廃棄フローに分岐する。資源・原材料は輸入及び国内採掘によって供給され、最終的に、一般及び産業廃棄物又は自然環境(大気・水圏・土壌)に蓄積される。鉛がプロセス間を移動するフラックスは、「鉛の移動速度は前プロセスに蓄積している鉛量に比例する」という仮定に基づき、微分方程式で表現した。なお、解析ソフトとして Microsoft Excel に Visual Basic で書かれたプログラムを用いた。生産過程での環境移行率及び廃棄率は、PRTR と各業界のデータを参考にして算出した。輸送販売プロセスにおける消費率は、鉛が使用されている製品が流通する割合より算出した。生活系消費プロセスでは、製品が使用された後、一般系選別・産業系選別プロセスのいずれに移行するか推定

した。選別および廃棄物処理プロセスにおいては、正確な資料がないため、大まかな分配率を予測した。産業廃棄プロセスでは、埋立・焼却とも分配率をそれぞれ50%とした。なお、今回は、大気・水圏・土壌相互の物質移動は考慮しなかった。輸入及び国内採掘鉛量は、(1)で得られた結果より、資源採掘プロセスには国内採掘と輸入を、原材料製、部品製造及び製品製造では輸入を割当て、総量を年間432,000tと設定した。

### 2. 有害物質の毒性評価手法の開発

#### 2-1 評価対象

国内外における法規制の有無、廃棄物に含有されるまたは焼却で生成すること、また変異原性や発ガン性情報の有無等を考慮して、13種の金属および有機化合物(主に単環・多環芳香族)を各試験共通の陽性対照物質の候補として選定し、標準品を入手した。また、9ヶ所のごみ焼却施設から、焼却底灰と飛灰を、4ヶ所の最終処分場から浸出水の原水、消毒前の処理水、および消毒後の放流水を採取した。

#### 2-2 採取試料の前処理

焼却灰では、乾燥させた試料について、酢酸エチルで振盪、超音波破碎する抽出操作を行った。回収された抽出液について、溶媒をエバポレータで減圧留去し、得られた残渣を酢酸エチル抽出物とした。浸出水では、加圧ろ過して懸濁物を取り除いたのち、XAD-2000樹脂を充填したガラスカラムに通水して有機物を吸着させた。樹脂より吸着物を適量の酢酸エチルで抽出し、脱水および減圧留去の後、得られた残渣を酢酸エチル抽出物とした。また、続けて、樹脂より吸着物をメタノールで抽出し、脱水および減圧留去の後、得られた残渣をメタノール抽出物とした。これらの操作は1ヶ所で一括して行い、各試験の担当者に分与した。

#### 2-3 遺伝子毒性試験

遺伝子突然変異を検知する Ames 試験では、菌株に *Salmonella typhimurium* TA98、TA100、TA92、TA94、とニトロ化合物に感受性の高い

YG1021、YG1024、YG1026 を用い、それぞれ肝臓機能を模した代謝活性化剤を加えた系 (+S9) と加えない系 (-S9) について、プレート法で復帰変異株のコロニー数を求めた。DNA 損傷を検知する *umu* 試験では、親株 *Salmonella typhimurium* TA1535/pSK1002 とアミノ化合物に感受性の高い NM2009 と低い NM2000 (+S9)、ニトロ化合物に感受性の高い NM3009 と低い NM1000 (-S9) を用い、菌体あたりの  $\beta$ -galactosidase 活性を測定した。上記細菌試験では被験物質は DMSO に溶解させて用いた。染色体異常を検知する小核試験では、試験動物として金魚 (*Carassius auratus*) の和金およびコメットを用い、被験物質は生理食塩水または DMSO に溶解させて、腹腔内に投与し、96 および 144 時間後に、末梢血または鰓を採取して細胞あたりの小核誘発頻度を調べた。DNA 損傷を検知する SCG 試験では、被験動物として和金を用い、被験物質はエタノール、DMSO またはアセトンに溶解させて、腹腔内に投与し、96 時間後に末梢血を採取して、アガロースゲル上で核溶解および DNA 巻き戻し後に電気泳動を行い、得られた核の形状、その出現頻度、tail moment 等を調べた。それぞれの試験では、用量作用曲線を求め、結果を相互に比較した。また、陽性対照については繰り返し試験を行い、試験法の感度および精度を検討した。

#### 2-4 ラットへの焼却灰の経口投与試験

都市ゴミ焼却施設で飛灰を採取し、直径約 150  $\mu\text{m}$  以下に調製した。飛灰粒子を 1% 濃度として粉末試料と混合し、水を加えて練り、乾燥後させた。動物は雌雄 Jcl-Wistar 系ラットの約 9 週齢を購入し、数日間予備飼育した後、対照群 (n=10) には通常固形試料を、また飛灰 (n=11) 群には 1% 飛灰混合飼料を摂取させた。約一ヶ月後、対照群どうしまたは飛灰群どうしの雌雄を交配させ、プラグの有無、体重変化および出産により受胎を確認した。プラグ形成確認後、雌雄を個別ケージに移し、約 20 日間それぞれの飼料を摂取させ体重変化を観察した。新生児の数、雌雄判別、奇形の確認などは出産後 2、3 日経過

後に行い、総数と母親一匹当たりの数を算出した。また、雄の各臓器の湿重量は雌の出産から約 3 ヶ月後にエーテル麻酔下、採血による死後、摘出して測定した。

#### C. 研究結果

##### 1. 人-環境物質代謝サイクルにおける有害物質の人および生態系への作用量の解明

(1) 統計資料、文献等より日本における鉛のマテリアルフローを特定した。年間約 40 万トンの鉛が国内で流通しており、私たちの生活環境に密着した製品では、鉛蓄電池 (19 万トン)、自動車 (7 万 6 千トン)、電化製品 (2 万 6 千トン)、塩化ビニル製品 (2 万 5 千トン) に多く使用されていることが分かった。また、製品からリサイクルされる鉛の割合は、製品段階で使用される鉛の約 50% (16 万 5 千トン) であった。

(2) マテリアルフローにおける物質の環境移行モデルを構築し、(1) で求めたデータを入力して解析を行った。いくつかの仮定の中で、生産段階で蓄積を考慮しないモデルが実際のマテリアルフローをより正確に再現しており、これは、生産過程においては、鉛の移行速度が各工程における鉛の蓄積量に依存しないためと考えられた。また、鉛は自然環境と産業廃棄物処理過程に著しく蓄積する傾向があり、これらの過程におけるリスク管理の重要性が示された。これらのモデルおよび解析は、各廃棄物処理段階での有害物質管理のプライオリティを決定するツールとして利用できる。

##### 2. 有害物質の毒性評価手法の開発

(1) 異なる遺伝子毒性試験法において、感度の補正および結果の相互比較のために、廃棄物関連試料中に存在する化学物質の中から、陽性対照物質を設定した。細菌試験において、S9mix による代謝活性を行う系では Benzo[a]pyrene が、行わない系では 1,8-Dinitropyrene が適当であると判断された。また、魚類を用いた系では Benzo[a]pyrene が陽性対照物質として適当であると考えられた。また、試験結果の繰り返し精

度は変動係数で 20~100%の範囲にあり、他の生化学的な指標に匹敵するものであったが、精度を向上させるために試験法をより簡易・迅速にして、試験回数を増やす必要がある。これらの結果は、廃棄物処理分野に遺伝子毒性試験法を適用するためのプロトコルとして利用できる。

(2) 都市ごみ焼却施設から採取した焼却灰と都市ごみ最終処分場から採取した浸出水について、溶媒または樹脂を用いた抽出・濃縮操作を行い、各種遺伝子毒性試験を行った。有意な遺伝子毒性を示す応答が得られた試料数は他の試験と比べて Ames 試験が少なかった。また、各試料に対する応答の大きさは試験法により異なっていた。さらに、特定物質群に対して特異的応答を示す細菌試験により、焼却灰や浸出水において、遺伝子毒性を示すニトロ化合物の存在が示され、浸出水では消毒によりこの種の化合物が生成される可能性が示唆された。焼却灰を食餌に混ぜてラットに経口投与する試験では、受胎率の低下、出生数の増加、雌雄比率の変化が観察された。これらの結果は、廃棄物処理分野へ遺伝子毒性試験が適用可能であることを示すものであり、これまで各所で単発的に得られていた毒性試験結果を総合評価する基礎資料となる。

#### D. 考察

本研究プロジェクトの目的は、廃棄物処理分野において、多種多様に存在する有害化学物質に対し、包括的かつシステムチックなリスクアセスメントに基づく総合的な管理システムを構築することである。鉛のサブスタンスフローに関して構築されたモデルは、さらに対象を他の物質へ拡張することによって、各廃棄物処理段階での既知の有害化学物質に対して管理の優先度を決定するツールとして活用できる。また、遺伝子毒性試験を用いたバイオアッセイ法は、プロトコル化し、さらに経験を積み重ねることによって、搬入・排出物のモニタリング、処理機能の評価、リスクが高い物質(群)の推定手法として、未知の有害化学物質に対応した施設管理に活用できる。これらは、廃棄物処理・処

分施設に対する住民の理解を得るために客観的かつ科学的な情報を提供する手段であり、学会誌等の関連雑誌への掲載、学会やシンポジウムでの発表、ホームページへの掲載等を通して、実際の施設を計画・運営する立場にある自治体関係者に提供することによってその効果を確かめることが可能となる。

#### E. 結論

1. 人-環境物質代謝サイクルにおける有害物質の人および生態系への作用量の解明

(1) 製品段階で鉛の 95%のフローを明らかにし、使用・廃棄・処理・処分における鉛の分配(蓄積)状態及び環境への移行量を推定する基礎データを得た。

(2) 環境移行モデルを用いたサブスタンスフローモデルを用いて、資源~最終処分に至る全コンパートメント及び環境(気圏・土壌圏・水圏)の鉛の蓄積を推定し、本モデルが有害化学物質管理のツールとして利用できることを明らかにした。

2. 有害物質の毒性評価手法の開発

(1) 種々の遺伝子毒性試験法の比較によって適切な陽性対象物質を明らかにし、廃棄物分野へ応用するための本法のプロトコル化を示した。

(2) 浸出水及び焼却灰や飛灰への適用から各種試験の応答特性を明らかにするとともに特定物質の存在も明らかにすることができ、スクリーニング法として本法が廃棄物分野に応用可能であることを示した。

#### F. 研究発表

1. 論文発表

A.Nishikawa, F.Furukawa, I-S Lee, K.Kasahara, Z.Tanakamaru, H. Nakamura, M.Miyauchi, N.Kinae and M.Hirose: Promoting effect of 3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone [MX] on rat glandular stomach carcinogenesis initiated with N-methyl-N'-nitro-N-nitroso-guanidine. *Cancer Res.* (in

press)

## 2. 学会発表

(1) 山田正人・井上雄三・木苗直秀・小野芳朗・吉野秀吉・市川 勇・田中 勝：廃棄物ライフサイクルにおける有害化学物質のリスク評価手法の開発(1)、日本環境変異原学会第 27 回大会(大阪) 要旨集、p155 (1998)

(2)山田正人・井上雄三・大迫政浩・木苗直秀・小野芳朗・吉野秀吉・市川 勇・田中 勝：廃棄物分野におけるバイオアッセイ手法の適用について (第 2 報) - 各種変異原性試験法の適用性の検討 -、第 6 回北海道大学衛生工学シンポジウム論文集、pp49-54 (1998)

(3)山田正人・井上雄三・大迫政浩・木苗直秀・小野芳朗・吉野秀吉・市川 勇・田中 勝：廃棄物処理・処分システムのリスク管理における遺伝子毒性試験の適用、第 9 回廃棄物学会研究発表会講演論文集 II、pp1029-1031 (1998)

(4)市川勇・田中勝・井上雄三・山田正人・今岡浩一・大村実・田中昭代：都市ゴミ焼却灰の長期間摂取による雄ラットの体重等に対する影響、第 9 回廃棄物学会講演論文集 I、pp423-425、1998.

(5)田中 仁・今村希美・古郡三千代・下位香代子・木苗直秀・山田正人・井上雄三・田中 勝：ゴミ焼却場灰および排水のバイオモニタリング、第 44 回日本薬学会東海支部大会 (静岡)、要旨集 p24(1998)

(6)加納佐江子・小野芳朗・山田正人：廃棄物浸出水等の内分泌攪乱性評価、日本水環境学会年会講演集、1999

## G. 知的所有権の取得状況

(なし)

厚生科学研究補助金（生活安全総合研究事業）  
分担研究報告書

サブスタンスフローアナリシスによる鉛の移動・蓄積および環境移行特性の把握

分担研究者 井上 雄三 国立公衆衛生院廃棄物工学部最終処分工学室長

研究要旨：既存資料を用いてわが国の鉛のマテリアルフロー（MF）を作成した。その中で鉛の多い製品として順に鉛蓄電池、自動車、電化製品、塩化ビニル製品になること、また製品段階において原料鉛の95%の物質収支を明らかにした。MFを基にして2種類（生産段階での蓄積考慮モデルおよび非考慮モデル）の環境移行モデルを解析し（サブスタンスフローアナリシス（SFA））、両モデルの実用性を評価した。改良環境移行モデルによるSFAから鉛は自然環境中および産業廃棄物処理過程に著しく蓄積する傾向を示し、リスク管理上のポイントを明示できた。また、各過程より大気中に排出される鉛の負荷量は、資源採掘および産業廃棄物焼却によるものが大きくなることを示した。

#### A. 研究目的

私たちの生活空間に存在している有害物質の動態や環境移行、そしてその結果生じる環境・健康リスクについてはほとんど解明されておらず、その対策も十分満足するものとはなっていないのが実状である。化学物質は人の生活および産業活動に不可欠なものであり、その利用に際しては科学的に厳密なリスク管理の下で安全性を確保する必要がある。

そこで本研究の目的は、第一に様々な分野で広く利用されている鉛に着目し、既往の研究ではまだ十分な知見が得られていない生活環境および産業環境中の鉛の動態および環境移行量を明らかにするために、マテリアルフロー(Material Flow)を作成することであり、第二にこの調査により得られた情報に基づいて環境移行モデルを構築し、パーソナルコンピュータを用いたサブスタンスフローアナリシス(Substance Flow Analysis :SFA)を行い、将来にわたる環境蓄積量の予測を行うことである。なお、得られた知見によって私たちは鉛に関するリスク管理の方策を手にすることが可能となる。

#### B. 研究方法

##### 1. 鉛の毒性について

重金属の1つである鉛は、鉛蓄電池の電極やハンダ、無機薬品原料など広い分野で用い

られており、私たちの生活に密接な金属である。しかし、鉛は人体に有害であり、経口および皮膚摂取により、慢性中毒（疲労、皮膚蒼白、便秘、腹痛、けいれん）および急性中毒（嘔吐、腹痛、下痢、血圧低下、昏睡）を引き起こす。また、乳幼児の血中鉛濃度が増加すると、知能指数の低下に関連する可能性も指摘されている。今日の社会においては、上記のような疾病を訴える人々が増加しているという傾向は見られないが、鉛のライフサイクルフローを考えた場合、製品の製造・使用および廃棄過程で環境（大気・水域・土壌）中に放出され、最終的には生物体内に蓄積され、今後環境・健康リスクが増大する可能性が十分考えられる。

わが国では今までの多くの知見から鉛の排出量は種々の法律によって規制されている。その一例を挙げると、

- ①環境基本法第16条による公共用水域の水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準として、鉛の基準値を0.01mg/lと定めている。
- ②大気汚染防止法第2条第1項第3号の政令では、有害物質として鉛を規定しており、その排出基準は、同施行規則第5条で業種別に20mg/m<sup>3</sup>N（ガラス又はガラス製品の製造）、10mg/m<sup>3</sup>N（焙焼炉、転炉、溶解炉および乾燥炉等）、30mg/m<sup>3</sup>N（焼結炉又は



溶鉱炉)

③水質汚濁防止法第3条第1項では、鉛およびその化合物の排水基準を0.1mg/lと定められている。

④水道法第5条第2項では、総理府令で水道原水の水質基準を0.05mg/lと規定している。しかし、これらの基準や規制は、莫大な鉛の使用の下で環境移行量を科学的に把握し、リスク管理を設定した上で定められたものではない。

## 2. 既往の研究

有毒性の高い鉛を含む重金属の環境リスクに関する研究は、多くの研究者によって行われている。次にその一例を示す。

オランダ・ライデン大学の Ester らは、サブスタンス・フローアナリシスを行い、ヨーロッパ全体におけるカドミウムの環境移行制御政策を提言している。彼らのモデルでは、カドミウムの使用をリン酸肥料（混入）と経済利用（主にバッテリーと顔料）に分け、経済蓄積量、環境移行量、遮断処分による永久固定量が政策によってどのように変化するかを評価している。

一方、我が国では、有害物質の総合的な適正管理方策の検討の試みとして、国立公衆衛生院の井上らによるサブスタンスフローアナリシスの鉛への適用が行われている。しかし、解析には製品や部品ごとに含まれる鉛量の綿密な調査が必要であり、現在のところ研究途中となっている。さらに、有害物質のライフサイクル・アセスメント(Life Cycle Assessment; LCA)手法の適用については京都大学の酒井らによって検討されている。

また、鉛の排出抑制に着目した研究も進められている。近畿大学の森本らは、ハンダで使用される鉛の代替品としてスズ・亜鉛およびビスマスを使用した鉛フリーハンダに着目し、その機械的強度や腐食特性等について報告を行っている。このような鉛代替品が実用化されると、有害な鉛の使用量を抑えること

が可能となる。また、重金属類の溶出挙動に関しては、京都大学環境保全センターの水谷らが焼却灰からの金属類溶出について報告している。

## 3. 鉛に関するマテリアルフロー

### 3-1 鉛のライフサイクル

鉛は、現在国内総需要量の70%が蓄電池として利用されている。蓄電池の用途は自動車用と産業用に分類される。自動車用蓄電池は、数年間使用された後、解体業者や販売店などを経て回収され精練される。産業用蓄電池については、5年間ほど使用された後、交換回収される。このようにして、廃蓄電池からの鉛の再生利用率（リサイクル率）は、高い値を保っている。ところが、鉛の価格に低迷が起こると、回収・再生意欲が減退し、リサイクルルートにある鉛が滞り、その結果、不法投棄などによって環境リスクの増加が懸念される。

その一因として、新鉛の価格下落に伴う再生鉛の下落が挙げられる。これにより、再生精練業者が回収業者から購入する廃蓄電池の価格も低下し、回収することによる利益が得られなくなってしまう。また、廃蓄電池からの再生鉛の需要が蓄電池の性能向上に伴い低下していることもその要因として挙げられる。

電池に廃電池からの再生鉛を使用する場合、そこに含まれるアンチモンを除去しない限り再利用できないという問題がある。それに加え、リチウム電池などの新種の電池が使用されるようになれば、市場の鉛滞留量が増大する可能性は高い。また、蓄電池以外の製品に使用された鉛のリサイクルは非常に難しいといわれ、その多くは廃棄物として排出されている。また、廃棄物中より焼却システムに入る鉛は、焼却処理によって飛灰中に濃縮され、その一部は飛散し、また雨水へ溶出することによって環境中に放出されると考えられる。

### 3-2 マテリアルフローの作成

現在、国内において鉛がどの程度輸入・採

表1 調査対象とした製品

家電製品	冷蔵庫, 洗濯機, ビデオ, オーディオセット, テレビ, デスクトップ型パソコン, 電子レンジ
自動車	自動車, 自動二輪車
大型含量製品	鉛蓄電池, 鉛チューブ, ガラス製品, 電球, 乾電池, 塗料
その他	吸水管, 配水管, 通気管, 陶磁器, ゴム, 塩化ビニル製品, 原子力機器, 医療機器

掘され、精錬を経て製品化されているか、また流通・消費・廃棄およびリサイクルがどの程度行われているのかを把握するため、本研究では、鉛のマテリアルフローを作成した。なお、調査対象年度は平成7年(1995年)度とした。各段階における調査方法を次に示す。

(a) 資源・原材料・部品段階

資源・原材料・部品については、通産省資源統計年報および同省機械統計年報に発表されているものを使用した。ただし、部品についての輸出・輸入量は不明なので、関係者へのヒアリングを行い、データを収集した。

(b) 製品段階

調査対象とする製品を表1に示す。製品における鉛使用のデータ収集は、主に関係者へのヒアリングを行い、併せて情報を収集した。

製品における年間の鉛使用量は、各製品1個当たりの鉛含有量を調査し、これに年間生産量を乗じて求めた。製品としての鉛が輸出入される量についても、同様にして算出した。電化製品や自動車のような多くの部品から構成される製品については、次のように求めた。

- ①製品に含まれる鉛が、どのような鉛使用部品から構成されているか把握する。
- ②それらの部品中の鉛含有量を各々算出し、その総和を製品一つ当たり鉛含有量とする。
- ③上述の算出方法と同様にして製品全体の鉛量を求める。

C. 研究結果

1. マテリアルフローの調査結果

1-1 鉛鉛資源

鉛鉛資源として、またリサイクル等により回収される鉛量を表2に示す<sup>11)</sup>。海外からの

表2 鉛資源の供給量(1995年度統計値)

輸 入		175
		179
国内生産	国内採掘	16
	金銀鉛	2
	スクラップ	92
	その他	69
合 計		354

輸入は、年間 175,000t、国内での採掘量は 16,000t、国内で採掘された金銀鉛より副産物として得られる鉛量は 2,000t となっている。また、スクラップからリサイクルされた鉛量は 92,000t、その他より 69,000t の鉛が二次資源としてリサイクルされている。

1-2 原材料および部品

平成7年度における鉛の需給量を表3に示す<sup>11), 12)</sup>。電気鉛、再生鉛および故・くず鉛が原材料となる。なお、ここでいう電気鉛・再生鉛・故又はくずとは、次のことを指す。

【電気鉛】 祖鉛(鉛物として採掘された鉛)を精錬所で電気分解して作られた鉛で純度99.99%以上のもの。

【再生鉛】 バッテリーや鉛管板等のスクラップを溶かしあわせて作られた鉛。

【故・くず】 不明。様々な使用済み製品から回収され、故又はくずとなった鉛が、新たに電気鉛や再生鉛になると考えられる。

内需の72%を占める蓄電池は、自動車用のバッテリーや非常用電源として使われる小型シール電池に使われている。次に14%を占める無機薬品は、鉛丹(Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)、鉛白(2PbCO<sub>3</sub>Pb(OH)<sub>2</sub>)、リサージ(PbO)に鉛が使用されており、塩化ビニル樹脂の安定剤、ブラウン管やクリスタルガラスなどのガラス製品、塗料、陶磁器の釉薬などに利用されてい

表3 1995年度鉛の需給量

単位：t

		電気鉛	再生鉛	故・くず鉛	合計	
供給		329,660	80,546	222,982	410,206	
	月始在庫	28,272	8,298	23,300	36,570	
	生産		226,564	59,883	-	286,447
		国内鉱出	8,947			
		海外鉱出	139,170			
		スクラップ	38,021			
		その他	40,426			
	発生	-	1,131	28,746		
回収	-	-	170,936			
輸入	74,824	11,234	-	86,058		
需要		275,501	61,630	183,505	337,131	
	内需		274,305	59,370	182,310	333,674
		鉛管板	9,998	894	32	10,924
		蓄電池	187,809	45,314	11,361	244,484
		電線	3,806	30	-	3,836
		無機薬品	45,828	-	-	45,828
		はんだ	9,449	2,641	2,014	14,104
		減摩合金	45	5	12	62
		チューブ	433	1		434
		メッキ	328	3	1	332
		精錬	-	-	66,343	
		再生	514	7,304	99,456	7,818
	その他	16,095	3,178	3,091	22,364	
	輸出	1,196	2,261	1,195	4,652	
月末在庫		48,183	8,133	48,605	56,316	
生産業者		14,796	-	-		
販売業者		12,873	503	827		
消費者		20,514	7,630	47,778		

平成8年度通産省資源統計年報より

\*供給及び需要、需要の内需の合計については、故・くず鉛を含まない。

\*\*蓄電池のデータは機械統計年報と異なる。蓄電池の内訳を求める際に機械統計年報のデータと比例して求めた。

\*\*\*需要の内需合計は、製錬・再生部分及び故・くず鉛の動きが明確ではないため、合わせることができない。

る。

また、4%を占めるはんだは、電化製品の基盤や電球の口金として使用され、3%を占める鉛管板は、鉛管として給水管、排水管、通気管、鉛板として建築工事の防音壁、遮蔽用、その他として、原子力機器や医療機器として使用されている。

原材料の輸入は、電気鉛が75,000t、再生鉛が11,000tであり、輸出では電気鉛が1,000t、再生鉛が3,000t、故・くず鉛が1,000tとなる。部品系においては無機薬品が輸出入されており、その輸入量は、鉛丹が2,604t、リサーチが51,214tと合計が53,818tにもなる。リサーチの輸入量が多い理由は、塩化ビニル安定用やガラス用に用いられる無機薬品量が国内生産量だけでは足りないためと考えられる。一方、輸出量は、鉛丹115t、リサーチ145t

と合計で260tとなる。ここで、無機薬品の無機薬品の国内生産量および輸出入量の内訳(鉛換算量)を表4に示す。無機薬品は生産量、輸出入量とも鉛化合物(鉛丹・鉛白・リサーチ)として扱われているので、金属鉛量に換算して算出している。

国内生産量は重要部門ごとの出荷量が把握できたものの、輸出入量については化合物の総量しか調査できなかったため、国内需要割合に比例させて算出した。ただし、管球ガラスについては、国内で推定される需要量(蛍光灯、電球、テレビおよびデスクトップ型パソコンのブラウン管に使用される鉛量)を大幅に上まわったので、その差分はその他として取り扱うこととした。

## 1-3 製品

鉛含有製品における鉛使用量の調査方法は、

前述のとおりであるが、ここでは、各製品ごとのデータ入手先を次にまとめておく。

【自動車】 自動車および自動二輪車の鉛使用量、生産量、輸出入量は、(社)日本自動車工業会にヒアリングを行った。また、自動車用塗料については、関西ペイント(株)の発表資料を参考にした。

【電化製品】 電化製品に含まれる鉛量は、関戸らの調査結果を使用した。生産・輸出入台数は、洗濯機・冷蔵庫・電子レンジについては(社)日本電気工業会の資料を、ビデオおよびテレビについては(社)日本電子機械工業会が開設しているホームページ上の統計値を採用した。また、ステレオセットおよびデスクトップ型パソコンについては、生産台数しか調査できなかったが、それぞれ通産省機械統計年報および日本電子工業振興協会の調査値を使用した。

【大量含有製品】 鉛蓄電池の生産量は、通産省機械統計年報の調査値を使用し、輸出入量については、(社)電池工業会にヒアリングを行った。鉛チューブは通産省資源統計年

報の値を使用し、ガラス製品は日本無機薬品協会にヒアリングを行った。乾電池には(社)日本乾電池工業会へのヒアリングを行い、塗料については、前述の関西ペイントの資料を用いた。電球については(社)日本電球工業会にヒアリングを行ったが、様々な電球のひとつあたりの鉛含有量を把握することができなかった。そこで、中村らが調査した単位質量あたりの鉛含有量に着目し、電球の重量を調査し、それに基づき鉛含有量を推定した。

【その他】 給水管、排気管、通気管については、全国鉛管板工業協同組合にヒアリングを行った。陶磁器、ゴム、塩化ビニル製品の鉛使用量は、ガラス製品と同様に日本無機薬品協会にヒアリングを行った。なお、原子力機器および医療機器についてのデータ把握はできなかった。

以上の調査により、製品中の鉛使用量を算定した結果を表5に示す。鉛含有製品のうち、鉛使用量の多い製品を挙げると、鉛蓄電池(バッテリーおよび小型シール電池)が56%、バ

表4 無機薬品の部門別出荷量(鉛量換算)

(1995年度) 単位: t

	国内生産量	輸入	輸出
鉛丹 (Pb3O4)	6,712	2,640	115
塗料	2,418	937	41
管球硝子	21	8	0
陶磁器	661	258	11
光学硝子	408	159	7
硝子	445	172	8
蓄電池	430	167	7
その他	2,330	903	40
鉛白 (2PbCO3Pb(OH)2)	278	-	-
陶磁器	52	-	-
塗料	69	-	-
その他	157	-	-
リサーチ (PbO)	31,146	51,214	145
塩ビ安定剤	9,362	6,961	44
乾燥剤	153	87	1
顔料	1,656	1,187	8
蓄電池	1	0	0
光学硝子	812	136	4
硝子	1,306	33,775	6
陶磁器	9	0	0
ゴム	234	145	1
管球硝子	15,525	7,446	72
その他	2,087	1,477	9

\* 輸出内訳: 国内生産量の需要割合に比例させた  
\* 輸入内訳: ガラス、塩ビ安定剤については、製品側から予測した  
: その他 国内生産量の需要割合に比例させた

表5 製品中の鉛含有量(1995年度)

単位: t 割合%

自動車	自動車	85880.2	22.68
	自動二輪車	80153.5	21.17
		5726.7	1.51
家電製品		17890.4	4.72
	冷蔵庫	28.5	0.01
	洗濯機	13.4	0.00
	ビデオ	188.2	0.05
	オーディオ	25.9	0.01
	テレビ	13076.9	3.45
	DTパソコン	4380.1	1.16
	電子レンジ	177.5	0.05
大量含有製品		254656.3	67.25
	鉛蓄電池	199316.3	52.64
	鉛チューブ	422.0	0.11
	ガラス製品	37213.0	9.83
	電球	4928.5	1.30
	乾電池	4609.6	1.22
	塗料	8167.0	2.16
その他		20246.0	5.35
	吸水管	395.0	0.10
	排水管	2196.0	0.58
	通気管	34.0	0.01
	陶磁器	919.0	0.24
	ゴム	379.0	0.10
	塩ビ製品	16323.0	4.31
合計		378672.9	100.00

バッテリーを部品として組み込んでいる自動車が24%、塩ビ製品が7%である。電化製品中の鉛量は、全体の7%程度であるが、そのうちの96%がテレビおよびデスクトップ型パソコンのブラウン管に使用されている。なお、これらの調査結果は、日本国内で生産されている製品の鉛量であり、輸出入量は含んでいない。国内で流通している鉛量を算出する際には、別途輸出入量を求める必要がある。

次に、製品の一部として輸出入される鉛量の調査結果を表6に示す。輸入量として最も多ものは、鉛蓄電池の24,000tであり、ついで自動車の10,000t、電化製品の5,000tである。電化製品は輸出入ともテレビの占める割合が多い。輸出入を含めた製品としての国内流通鉛量の内訳は、鉛蓄電池が55%、自動車が22%、塩化ビニル製品および電化製品が7%である。以上の調査結果に基づき、作成した概略的な鉛のフローを図1に示す。

年間約40万トンの鉛が動いており、資源

段階から原材料段階に流入する鉛量の92%が実際に原材料となり、原材料段階から部品段階に入ってくる鉛量の98%が部品になっている。また、今回の調査では、部品段階から製品販売段階に流入する鉛量の96%が製品として利用されていることが製品に含まれる鉛量の調査より明らかとなった。

表6 輸出入製品に含まれる鉛量 (1995年度) 単位: kg

	輸出	輸入
自動車	7,026	750
自動二輪車	2,777	86
洗濯機	1	1
冷蔵庫	1	4
ビデオ	145	47
テレビ	4,805	12,415
電子レンジ	35	49
乾電池	989	379
鉛蓄電池	23,797	16,235
電球	803	90
合計	40,380	30,055

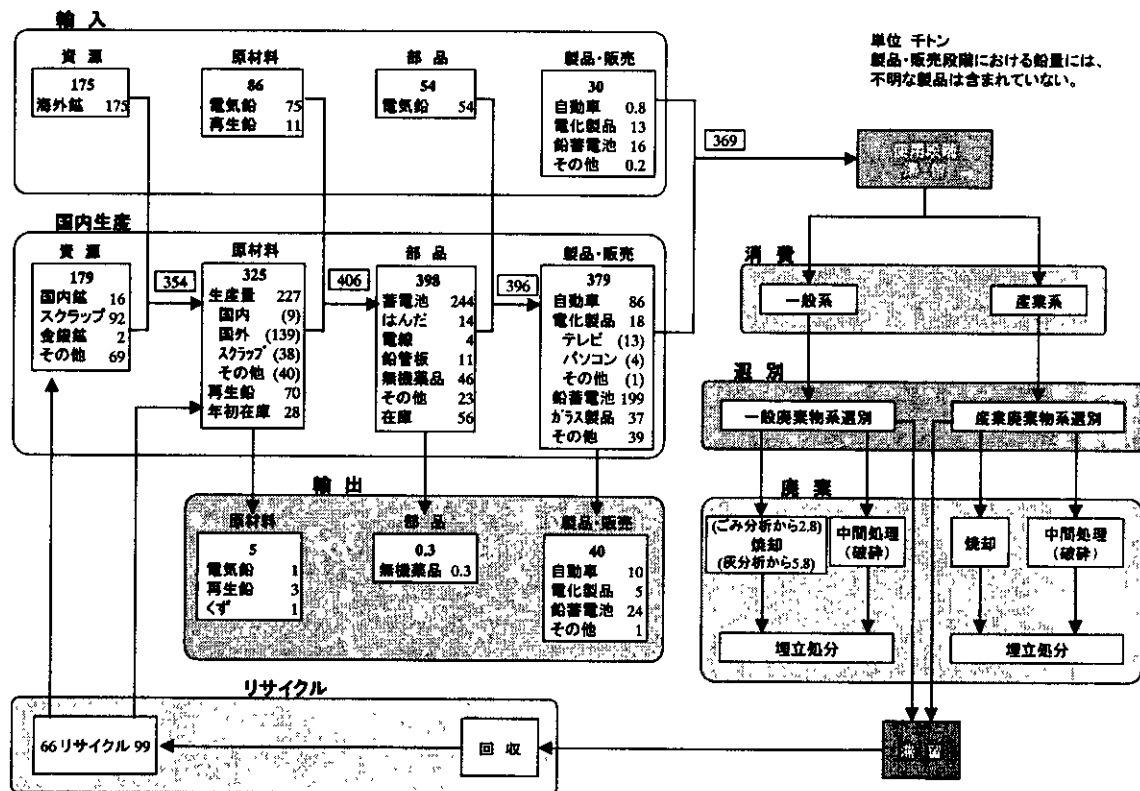


図1 概略的な鉛のフロー図 (1995年度データ使用)

## 2. 環境移行モデルを用いた解析

前項で明らかとなった鉛のマテリアルフローに基づき、鉛の挙動や流通特性、さらに蓄積量等が将来にわたって定量的に予測できることが望ましい。しかし、製品に含まれている鉛は、製造・輸送・廃棄等の各過程でその構成比等が変容していくためその移動経路および移動量を一義的にとらえることは非常に困難である。しかし、圏内に存在する鉛の総量は変化しない（質量保存の法則）ので、各プロセス間での鉛の物質収支に着目した物質収支フローは構築可能であると考えられる。

そこで、本報では、物質の移動速度フラックス（流束）のバランスを数式化し、これを用いたサブスタンスフローアナリシス（物質移動の数値解析）により鉛の環境移行モデル解析を行った。

### 2-1 環境移行モデルの作成

サブスタンスフローアナリシスを行う場合、

対象物質（ここでは鉛）のサブスタンスフローモデル（対象物質の採掘・精錬から製品段階を経て、消費・廃棄・リサイクルに至る全ライフサイクルモデル）を作成する必要がある。本報では、先の調査で得られたマテリアルフロー（図1）を参考に図2に示すサブスタンスフローモデルを作成した。

本モデルは、(A)～(G)の7過程、全24個のプロセスから構成されており、生産過程、生活系および産業系消費過程（輸出も含む）、廃棄物処理過程が主フローを構成している。一方、これら生産過程および消費過程のリンクするところに選別過程をおき、この過程を経てリサイクルおよび廃棄フローに分岐する構成となっている。また、資源・原材料は輸入および国内採掘によって供給され、最終的には、一般および産業廃棄物又は自然環境（大気・水圏・土壌）に蓄積されるモデルとなっている。図2に示したサブスタンスフローシ

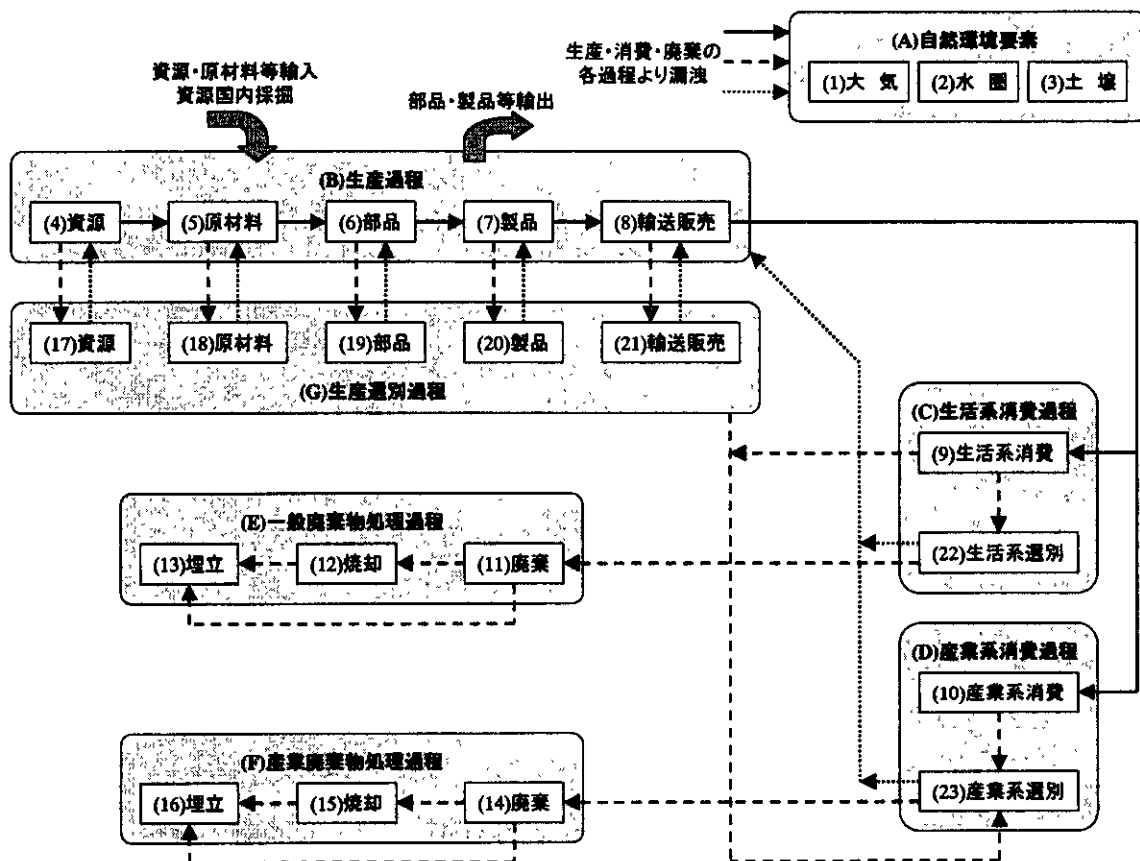


図2 サブスタンスフローモデルのシステム構成

システムの各プロセスの説明一覧を表7にまとめておく。

### 2-2 基礎式の作成

図2で作成したサブスタンスフローモデルを用いて、対象物質（鉛）の移動を考えることになるが、鉛があるプロセスから次のプロセスに移動する速度（単位時間あたりの移動量；フラックス）を定式化する必要がある。そこで本報では「鉛の移動速度は前プロセスに蓄積している鉛量に比例する」という過程に基づき、次の微分方程式を用いて定式化を行った。

図3に対象物質の物質収支モデルを示す。ここでは、一例としてA,B,Cの3プロセスから成るモデルを仮定し、時刻  $t$ [year]において各プロセスに対象物質が  $m_A(t)$ [ton]蓄積しているとする。また、プロセスBには外部から対象物質の流入  $I_B$ [ton/year]があると考え。ここで、プロセスBの物質収支は、プロセスAからの物質移動、プロセスCへの移動、プロセスBからの流入によりバランスしているの、式(1)~(3)のように表すことができる。

$$\frac{dm_A}{dt} = -\alpha m_A \quad (1)$$

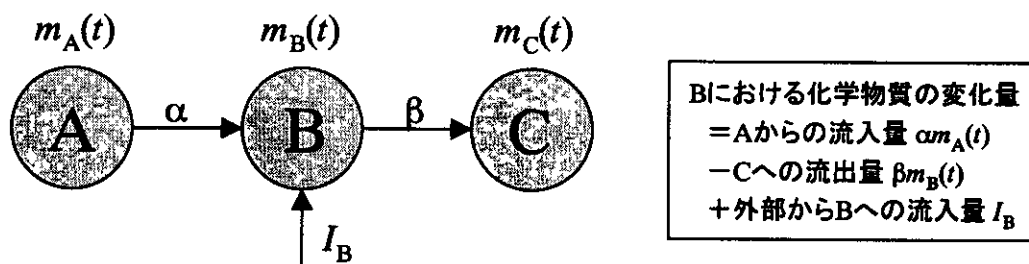


図3 廃棄物内化学物質の物質収支モデル

表7 サブスタンスフローモデルにおける各プロセスの説明

過程	番号	プロセス名	プロセスの説明
(A) 自然環境	1	大 気	自然環境要素としての大気
	2	水 圏	自然環境要素としての海洋・湖沼・河川など
	3	土 壌	自然環境要素としての土壌
(B) 生産過程	4	資源採掘	鉛鉱の採掘及び輸入
	5	原材料製造	鉛鉱を精錬した電気鉛の製造及び輸入
	6	部品製造	蓄電池電極や無機薬品等の製造及び輸入
	7	製品製造	自動車・鉛蓄電池等の鉛含有製品の製造及び輸入
(C) 生活系消費過程	8	輸送販売	生活系及び産業系への製品の輸送及び販売
	9	生活系消費	一般消費者が製品を使用
(D) 産業系消費過程	22	生活消費廃棄物選別	生活消費で生じた一般廃棄物から資源回収
	10	産業系消費	産業活動に製品を使用
(E) 一般廃棄物処理過程	23	産業消費廃棄物選別	産業活動で生じた産業廃棄物から資源回収
	11	一般廃棄	資源回収後の一般廃棄物を可燃及び不燃物に選別
	12	焼 却	一般廃棄物の焼却
(F) 産業廃棄物処理過程	13	埋 立	一般廃棄物の埋立
	14	産業廃棄	資源回収後の産業廃棄物を可燃及び不燃物に選別
	15	焼 却	産業廃棄物の焼却
(G) 生産選別過程	16	埋 立	産業廃棄物の埋立
	17	資源廃棄物選別	鉛鉱の採掘過程で生じた廃棄物から資源回収
	18	原材料廃棄物選別	電気鉛の製造過程で生じた廃棄物から資源回収
	19	部品廃棄物選別	鉛含有部品製造過程で生じた廃棄物から資源回収
	20	製品廃棄物選別	鉛含有製品製造過程で生じた廃棄物から資源回収
	21	輸送販売廃棄物選別	製品の輸送及び販売過程で生じた廃棄物から資源回収

$$\frac{dm_B}{dt} = \alpha m_A - \beta m_B + I_B \quad (2)$$

$$\frac{dm_C}{dt} = \beta m_B \quad (3)$$

ここで、式中の係数 $\alpha$ 、 $\beta$ は対象物質の分配率である。分配率の決定については次項で述べる。式(1)~(3)を離散化(前進差分)し、行列で表現すると式(4)が得られる。

$$\begin{pmatrix} 1+\alpha\Delta t & 0 & 0 \\ -\alpha\Delta t & 1+\beta\Delta t & 0 \\ 0 & -\beta\Delta t & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_A(t+\Delta t) \\ m_B(t+\Delta t) \\ m_C(t+\Delta t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_A(t) \\ m_B(t)+I_B \\ m_C(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

これは、 $m_A(t+\Delta t)$ の3変数を未知数とする連立一次方程式であり、この行列を $t=0$ より順次解くことによって、各プロセスに蓄積する対象物質の経時変化が求められる。

なお、本論では解析ソフトとしてMicrosoft ExcelにVisual Basicで書かれたプログラムをリンクさせたものを用いた。

### 2-3 対象物質の分配係数の決定

環境移行モデルによる解析を行うためには、前項でも説明したとおり、各プロセスでの分

配係数を決定しなければならない。ここでは、各プロセスにおける係数の決定方法について概説する。

(1)~(3) 本報では、気圏・水圏・土壌圏相互の物質移動は考慮していない。

(4)~(7) 各プロセスでの環境移行率(大気・水圏・土壌)および廃棄率は、PRTRによる鉛の排出データを参考に推定を行った。PRTRの対象地域と全国の製造品出荷額の比から全国換算排出量を算出した。資源採掘・原材料については金属系製造業のデータ、部品製造は化学系製造業、その他の製造業のデータ、製品製造は機械系製造業のデータを参考にした。

(8)~(10) 輸送販売プロセスにおける生活系および産業系消費率については、鉛が使用されている製品が生活系・産業系に流通する割合(表8)より算出した。さらに、生活系消費プロセスでは、輸送販売プロセスより供給された製品が使用された後、一般系選別・産業系選別プロセスのいずれに移行するか推定(表9)を行った。

表8 輸送販売プロセスにおける分配率の推定

	生活消費率	生活製品鉛量[t]	産業消費率	産業用品鉛量[t]
自動車	0.73	58,512	0.27	21,641
自動二輪車	0.8	4,581	0.2	1,145
冷蔵庫	0.7	20	0.3	9
洗濯機	0.9	12	0.1	1
ビデオ	0.9	169	0.1	19
オーディオ	1	26	0	0
テレビ	0.7	9,154	0.3	392
パソコン	0.5	2,190	0.5	2,190
電子レンジ	0.8	142	0.2	35
小型シール電池	0	0	1	20,878
自動車用蓄電池	0.73	101,360	0.27	37,489
二輪車用蓄電池	0.8	3,163	0.2	791
鉛チューブ	1	422	0	0
ガラス製品	0.9	6,107	0.1	679
電球	0.5	2,464	0.5	2,464
乾電池	0.8	3,688	0.2	922
塗料	0.1	817	0.9	7,350
陶磁器	1	98	0	0
ゴム	1	644	0	0
塩ビ製品	0	0	1	24,777
合計	0.62	193,568	0.38	120,783



表9 生活消費プロセスにおける分配率の推定

一般選別品	鉛量[t]	産業選別品	鉛量[t]
冷蔵庫	20.0	自動車	58,512.0
洗濯機	12.0	自動二輪車	4,581.4
ビデオ	169.4	自動車用蓄電池	101,359.6
オーディオ	25.9	二輪用蓄電池	3,162.8
テレビ	9,153.8		
DTパソコン	2,190.0		
電子レンジ	142.0		
鉛チューブ	422.0		
ガラス製品	6,106.5		
電球	2,464.2		
乾電池	3,687.6		
塗料	816.7		
陶磁器	98.0		
ゴム	644.0		
合計	25,952.2	合計	167,615.8

(11)~(23) 各プロセスにおいては、正確な資料がないため、大まかな分配率を予測し、この値を採用した。なお、(14)産業廃棄プロセスにおいては、埋立・焼却とも分配率をそれぞれ50%とした。

以上の手法により、各プロセスにおける対象物質の分配率を決定した。設定した分配率を表11に示す。なお、輸入および国内採掘によってモデル内に流入する鉛量は、前述のマテリアルフロー調査結果に基づき、資源採掘プロセスにおいては国内採掘と輸入を、原材料製、部品製造および製品製造では輸入によ

表10 各プロセスへの鉛流入量

プロセス名	項目	入力量 千t/年
(4)資源採掘	資源輸入	175
	国内採掘	87
(5)原材料製造	原材料輸入	86
(6)部品製造	部品輸入	54
(7)製品製造	製品輸入	30
合計		432

る流入を考慮しており、その総量は表10のとおり年間432,000tと設定した。

#### D. 考察

##### 1. 環境移行モデルの解析結果

上記で作成した環境移行モデルを用いて数値解析をおこなった結果を次に示す。なお、本解析は、経過時間  $t=0$  における各プロセスの蓄積量はすべて0と設定し、時間刻み  $\Delta t=0.5$  年、解析終了時刻を10年とした。

図4はサブスタンスフローアナリシス（数値解析）により得られた各過程における鉛蓄積量の経年変化を示す。時間が経過するに伴い、いずれの過程にも鉛が蓄積することがわかる。特に、生産過程における鉛の蓄積速度が他の過程における蓄積速度比べて著しく高くなっている。

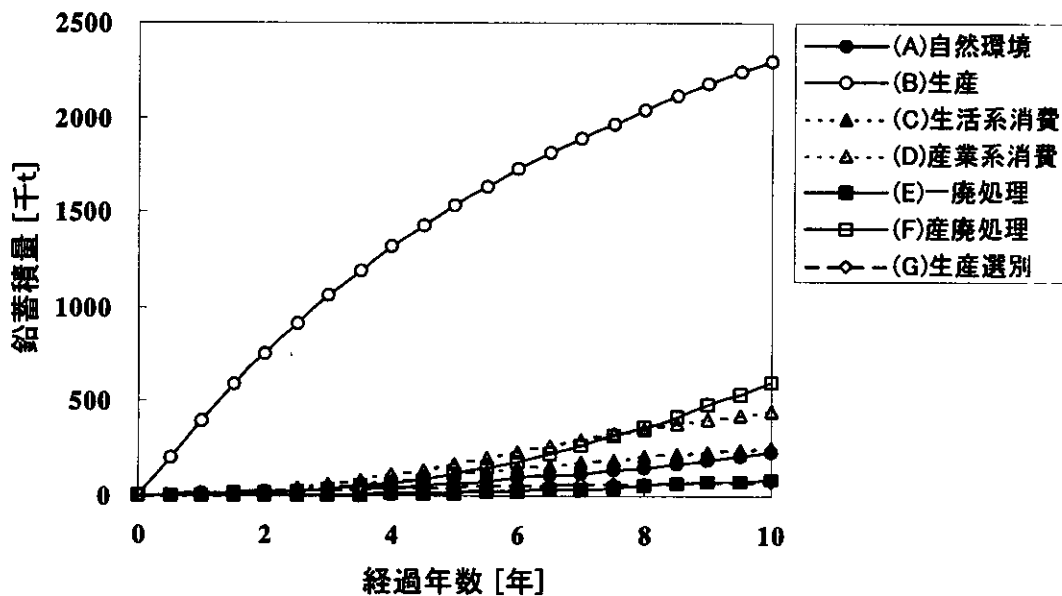


図4 各過程における鉛蓄積量の経年変化

表11 各プロセスにおける対象物質の分配率

(A) 自然環境因子

(1) 大気	分配率
水域移動率(2)	0
土壌移動率(3)	0
(2) 水域	分配率
大気移動率(1)	0
土壌移動率(3)	0
(3) 土壌	分配率
大気移動率(1)	0
水域移動率(2)	0

(B) 生産過程

(4) 資源採掘	分配率
大気発散率(1)	0.04
水域発散率(2)	0.002
土壌発散率(3)	0.002
原材料製造率(5)	0.92
資源輸出率(24)	0
廃棄資源率(17)	0.036
(5) 原材料製造	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.0005
土壌発散率(3)	0.0005
部品製造率(6)	0.96
原材料輸出率(24)	0.01
廃棄資源率(18)	0.029
(6) 部品製造	分配率
大気発散率(1)	0.004
水域発散率(2)	0.001
土壌発散率(3)	0.001
製品製造率(7)	0.9
部品輸出率(24)	0
廃棄資源率(19)	0.094
(7) 製品製造	分配率
大気発散率(1)	0.0008
水域発散率(2)	0.0002
土壌発散率(3)	0
製品製造率(8)	0.9
製品輸出率(24)	0.095
廃棄資源率(20)	0.004
(8) 輸送販売	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
生活消費率(9)	0.62
産業消費率(10)	0.38
廃棄資源率(21)	0

(C) 生活系消費過程

(9) 生活系消費	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
一般廃棄率(11)	0
産業廃棄率(14)	0
一般選別率(22)	0.13
産業選別率(23)	0.87
(22) 生活系選別	分配率
大気発散率(1)	0.005
水域発散率(2)	0.001
土壌発散率(3)	0.005
資源リサイクル率(4)	0.1
原材料リサイクル率(5)	0.1
部品リサイクル率(6)	0
製品リサイクル率(7)	0
生活消費財廃棄率(11)	0.789

(D) 産業系消費過程

(10) 産業系消費	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
産業廃棄率(14)	0
産業選別率(23)	1
(23) 産業系選別	分配率
大気発散率(1)	0.005
水域発散率(2)	0.005
土壌発散率(3)	0.005
資源リサイクル率(4)	0.24
原材料リサイクル率(5)	0.36
部品リサイクル率(6)	0
製品リサイクル率(7)	0
産業消費財廃棄率(14)	0.385

(E) 一般廃棄物処理過程

(11) 一般廃棄	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
焼却率(12)	0.85
埋立率(13)	0.15
(12) 一般焼却	分配率
大気発散率(1)	0.01
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0
埋立率(13)	0.98
(13) 一般埋立	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0.001

(F) 産業廃棄物処理過程

(14) 産業廃棄	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
焼却率(15)	0.5
埋立率(16)	0.5
(15) 産業焼却	分配率
大気発散率(1)	0.05
水域発散率(2)	0.05
土壌発散率(3)	0.05
埋立率(16)	0.85
(16) 産業埋立	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0.01

(G) 生産選別過程

(17) 資源廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0.01
資源リサイクル率(4)	0
産業廃棄率(23)	0.98
(18) 原材料廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0.01
水域発散率(2)	0.01
土壌発散率(3)	0
資源リサイクル率(4)	0.98
原材料リサイクル率(5)	0
産業消費財廃棄率(14)	0
(19) 部品廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0.005
水域発散率(2)	0.0005
土壌発散率(3)	0.0005
資源リサイクル率(4)	0.3
原材料リサイクル率(5)	0.3
部品リサイクル率(6)	0.194
産業消費財廃棄率(14)	0.2
(20) 製品廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0.001
水域発散率(2)	0.0005
土壌発散率(3)	0.0005
資源リサイクル率(4)	0
原材料リサイクル率(5)	0.3
部品リサイクル率(6)	0.3
製品リサイクル率(7)	0
産業消費財廃棄率(14)	0.398
(21) 輸送販売廃棄物選別	分配率
大気発散率(1)	0
水域発散率(2)	0
土壌発散率(3)	0
資源リサイクル率(4)	0
原材料リサイクル率(5)	0
部品リサイクル率(6)	0
製品リサイクル率(7)	0
産業消費財廃棄率(14)	0

得られた解析結果について、経過年数 10 年での各プロセスにおける鉛蓄積量をグラフ化したものを図 5 に示す。また、これら蓄積量を各過程別に合計し、その蓄積割合を円グラフ化したものを図 6 に示す。10 年経過後には、生産過程、特に原材料製造プロセスに最も多く蓄積し、その蓄積量は 5,183,000t にも

達する。これは、今回採用した環境移行モデルにおいて、鉛の移動速度がその蓄積量に比例する、すなわち、そのプロセス内に鉛が蓄積しなければ、次のプロセスへ鉛が移動しないという基礎式を採用しているためと考えられる。

実際の経済流通を考慮すると、生産段階で

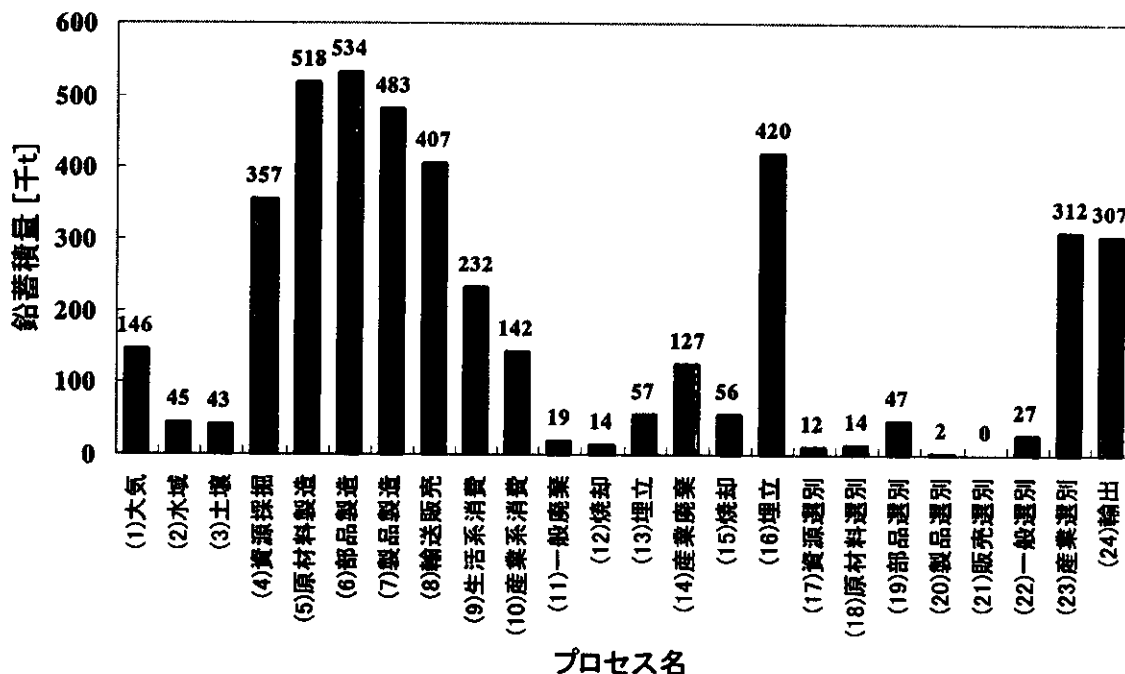


図5 各プロセスにおける鉛蓄積量(経過年数:10年)

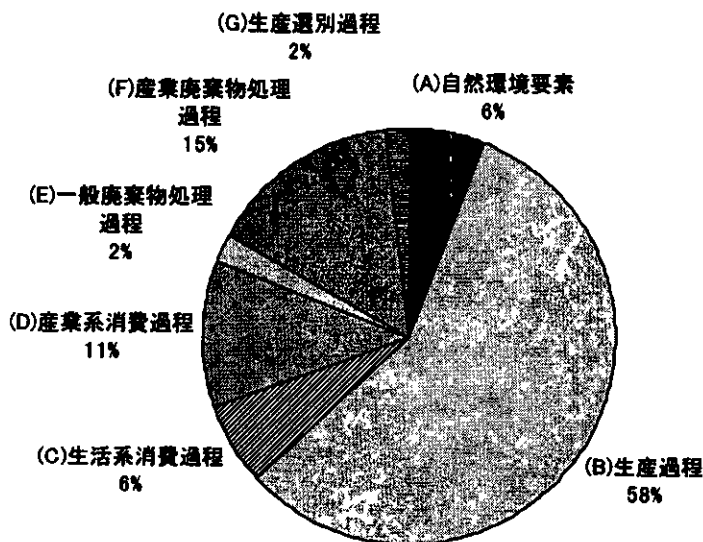


図6 各過程における鉛蓄積量の割合(経過年数:10年)

は通常、一定量の鉛を在庫として蓄積（対流）させる場合を除き、蓄積は起こらないと考えられる。また、生産段階における鉛の流通量は、次のプロセス（下流側）からの需要に応じて決定され、前プロセス（上流側）の影響は少ないことが予想される。本解析で採用した基礎式は、自然科学的な法則に基づいており、経済活動のような人間の意志によってコントロールされる系に対しては適応性に問題点を含んでいる。しかしながら、本モデルにおいても実際の鉛の分配の傾向を表現しているものがある。例えば産業廃棄物処理過程を見ると、産業廃棄物埋立プロセスにかなりの蓄積を生じるという傾向を表している。また、一般廃棄物処理過程の分配（蓄積）される鉛の量は、産業廃棄物処理過程のその 1/7 程度と計算されているが、これは大量含有廃棄物（廃自動車や廃バッテリーなど）のフローが産業廃棄物系を通して最終的に処分場に到達することから容易に納得できる配分であることがわかる。

一方、自然環境中（大気・水域・土壌）に排出される鉛量の割合は、6%と意外と多くなる傾向を示しており、なかでも大気への放出量が非常に多いことも注目すべき点である。

ここで、使用している環境移行モデルを改良し、生産過程において蓄積が発生しないモデルによって再検討を行った。

## 2. 改良型環境移行モデルによる検討

本報で作成した環境移行モデルでは、生産過程にのみ鉛の流入（国内採掘・輸入）を考慮している。そのため、生産過程で鉛の蓄積が生じると考えられる。そこで、輸入・国内採掘によりモデル内に流入する鉛および各種選別プロセスから生産過程に移行する鉛は、過程内で蓄積することなく、全量が表 11 に示した分配率に応じて生産過程から他の過程（自然環境要素・生活系および産業系消費過程・生産選別過程）に分配されると仮定した。

ここで、改めて改良型モデルの説明を行う。図 7 は、鉛の物質移動を水の流れに例えて、先に示した環境移行モデル（生産過程における蓄積を考慮）と改良型環境移行モデルの違いを模式的に示したものである。従来のモデルでは、鉛の移動速度は、そのプロセス中に蓄積した鉛量、すなわち水柱の高さに依存していた。そこで、改良型モデルでは、生産過程についてはパイプ内を水が移動するようないわゆる「押し出し流れ」を想定し、流入し

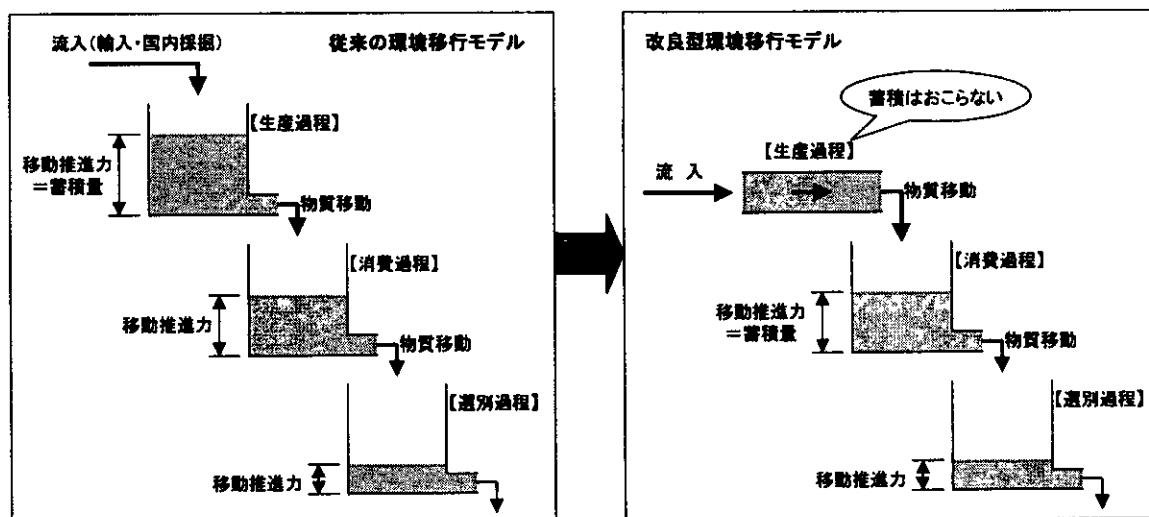


図7 従来型および改良型環境移行モデルの概念図