



Title	廃棄物ライフサイクルにおける有害物質のサブスタンスフローアナリシス
Author(s)	井上, 雄三; 山田, 正人; 大迫, 政浩 他
Description	第5回衛生工学シンポジウム (平成9年11月6日 (木) -7日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 3 廃棄物 . 3-1
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 5, 101-106
Issue Date	1997-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7713">https://hdl.handle.net/2115/7713</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	5-3-1_p101-106.pdf



### 3-1

## 廃棄物ライフサイクルにおける有害物質のサブスタンスフローアナリシス

国立公衆衛生院 井上雄三、山田正人、大迫政浩、河村清史、田中 勝

### 1. はじめに

私たちの身近な生活空間（居住、労働、都市、地域）には、廃棄物に由来するまたは廃棄物処理過程から排出される有害物質が存在しており、生活環境や自然環境が汚染され、健康・環境リスクが増大している。しかし、廃棄物ライフサイクルにおける有害物質の動態とその環境・健康リスクに関しては、未だ十分な科学的知見が得られておらず、それゆえ、行政施策も十分満足なものとはなり得ていない。このような状況は、国民の廃棄物処理施設に関する不信感をいわずらに煽り、我が国の廃棄物施策の根幹をも揺るがしかねない。

廃棄物ライフサイクルの中で、ごみ焼却施設において微量ながら生成される有機ハロゲン類や、埋立処分場において埋め立てられた廃棄物由来の重金属、有機塩素化合物等の有害物質、さらにプラスチック可塑剤などの未規制化学物質の漏出或いは生活排水処理施設からの放流水などによる周辺大気環境や水道水源、農業環境などへの汚染が懸念されており、現在だけでなく将来にわたって嚴重なリスク管理が求められている。しかしながら、廃棄物に含まれる有害物質の毒性や廃棄物ライフサイクルにおける有害物質の動態、環境中への移行による環境リスクの発生などについては、ほとんど明確になっていないのが現状である。

そこで本研究プロジェクトにおいては、廃棄物ライフサイクル由来の有害物質に関する居住・都市・地域環境の将来にわたる長期的かつ総合的な管理体制を確立していくことを目的として、人-環境系物質代謝サイクルにおける有害物質の動態の解明のために有害物質に関するサブスタンスフローアナリシスSFAを行った。

### 2. サブスタンスフローアナリシスSFAの必要性

サブスタンスフローアナリシスの目的は、現行の社会・経済システムにおいてある物質がどのようなフローで流れていき、どのような製品となって消費・利用され、廃棄されているかを理解し、その過程で環境にどの程度漏洩するかを把握することにある。これは、次の運命評価に用いられる環境進入量の推定を行うものである<sup>1,2)</sup>。従来、このアナリシスは産業分野において単に素材需給予測として物質の流れを正しく理解するために、産業活動において極めて重要であったが、今日では同時に環境への排出制御として、特に有害物質に関するリスク管理において極めて重要となっている。

今日、もう一つの環境負荷評価法として製品あるいはサービスに対する環境負荷を評価するLCAライフサイクルアセスメントが注目され、多くの解析が各分野で解析が進められている<sup>3)</sup>。これはある製品やサービスに係るすべてにおける環境負荷を算定する手法であり、生産段階での商品開発や消費段階での選択手法として重要である。しかし、LCAは個別商品の環境負荷比較としては優れているが、有害物質管理のようなリスク管理において特定物質の全環境負荷を推定するような場合、またある有害物質の環境排出量を決定するような政策決定、あるいは廃棄物処

理システムを変更した場合の環境負荷の変化を予め予測するような場合には不向きであり、そのためには特定物質のライフサイクルを解析する必要が起り、特定物質の物質収支を解析するサブスタンスフローアナリシス S F A が必要となる。

### 3. サブスタンスフローアナリシス S F A の特徴

先に述べたようにこのアナリシスは、物質を特定して行程ごとに物質収支をとり、最終的に製品にどの程度その物質が含まれるかを予測し、その製品が消費され利用された後廃棄された場合、どのルートに乗って廃棄され、最終処分されるかを明らかにし、文字通りゆりかごから墓場までのライフサイクルまでの各工程でどの程度環境移行量があるかを予測・評価するものである。また、感度解析によってどの行程あるいはどの製品を制御したら環境移行が減少するか、プライオリティを評価することができ、政策決定支援システムとしての役割を発揮できる。また、今日相次いで行われている廃棄物処理法の改正によって環境移行量がどのように変化するのか、予めその効果を科学的に予測することが可能となる。

このようなモデルは、Frishcer et al.<sup>1)</sup>、Conway et al.<sup>2)</sup>らによって 1980 年代のはじめになされている。しかし、これらのモデルは主として製品が農業等で使用過程で環境に排出される場合に適用されたモデルで、廃棄過程が主要な環境排出となる場合には適用不可能となる。このような場合に適用可能なモデルとして Ester et al.<sup>4)</sup>は、カドミウムの S F A を行い、EU 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。こ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（主として電池と顔料）に分けて、経済蓄積、環境移行量および永久固定（遮断処分）を政策によってどの程度配分変更できるかを評価している。しかし、この中には耐久消費財等の排出時間遅れ等動的評価がなされておらず、評価の信憑性に疑問が残っている。そこで著者らは新たにフローの各工程ごとに物質の質量とフラックス間に一定の関係があるとして収支式を構築し、年スケールで計算を行うことによってマルチメディア（大気・水域・土壌）への物質の配分量を累加し、環境移行量を評価することとした。

### 4. サブスタンスフローアナリシス S A F に基づく環境移行モデル

#### (1) モデルの概要とシステム構成

有害物質は製造・輸送・廃棄の各過程で種々の製品に含まれ、各過程でその構成比などが変容していくことが考えられ、そのような複雑な経路におけるサブスタンスフローを一義的に捉えることは困難なように思われる。しかし、有害物質の総量は変化しないから各過程間での物質収支だけに着目したサブスタンスフローは構築可能である。もちろん有害物質の総量は製品に含まれる総量であるから、それらの製品の製造・輸送販売・廃棄を考慮する必要がある。そこで総質量だけに着目してかなり荒い仮定からフラックスを推定できるモデルを検討した。そのモデルのシステム構成を図 1 示す。サブスタンスに関するゆりかごから墓場までサブスタンスライフサイクルにおいて有害物質が環境に移行する量を評価するもので、先に述べたように各過程、例えば部品生産あるいは消費、廃棄等でフラックスのバランスを数式化しており、これにより有害物質の定常的なバランスを気にすることなく解析が可能となる。

サブスタンスフローモデルのシステムは、23の過程および要素から構成されている（図1参照）。また、システムは生産過程、消費過程を二つ—生活系および産業系、および廃棄物処理過程の主フロー並びに最終評価領域の自然環境および国内外境界を備えている。これらのサブシステムあるいは各工程をリンクするところに選別過程（生産選別・生活系選別・産業系選別）を置き、この過程を経てリサイクルフローおよび廃棄物フローが分岐する構造となっている。環境への有害物質の排出は各サブシステムから水圏、地圏、気圏へ起こる。

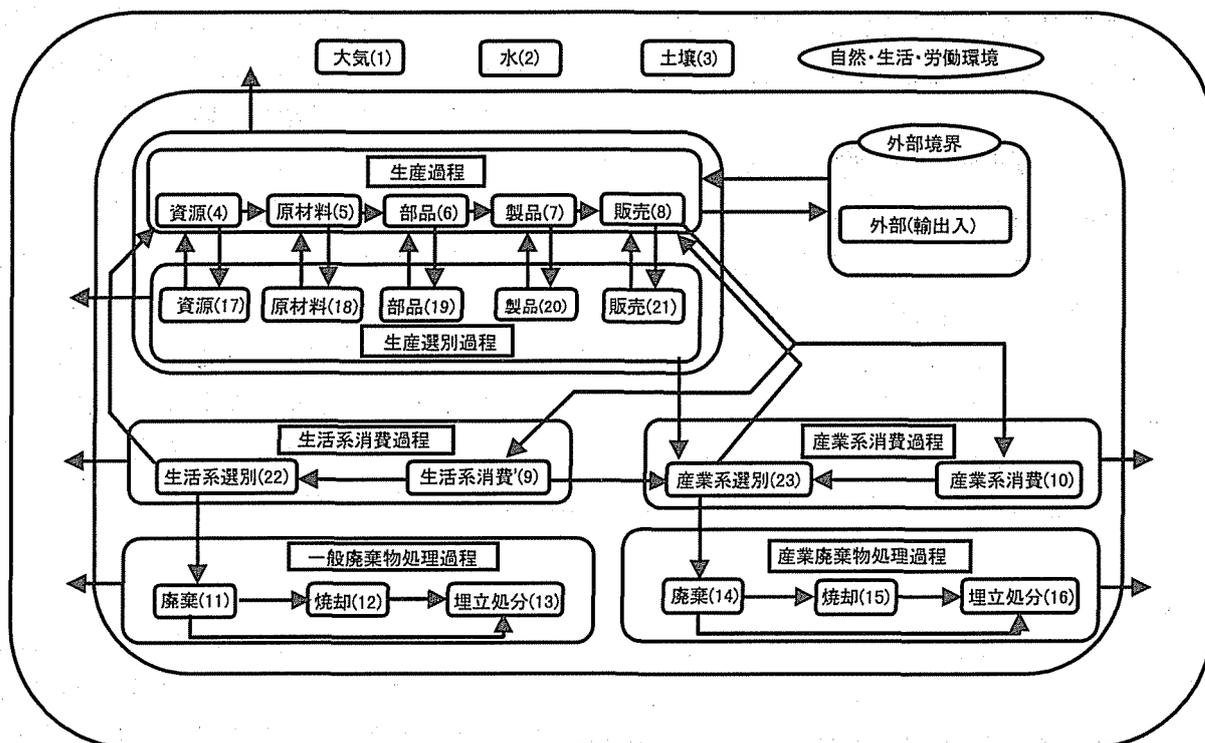


図1 サブスタンスフローモデルのシステム構成

## (2) モデルの定式化

上述のようにモデルは23の過程および要素に関する物質収支式を表せばよい。主フローはある過程と前後の過程間での物質のフローで表されるので、

あるプロセス*i*の単位時間当たりの質量の変化＝

その一つ前のプロセス*i-1*からの単位時間当たりの物質流入 +  
 その一つ後のプロセス*i+1*への単位時間当たりの物質流出 +  
 そのプロセスへの外部からの単位時間当たりの物質流入

で表されるので、数式で表すと以下のようなになる。

$$\frac{d m_i}{d t} = \alpha_{i-1} m_{i-1} + \alpha_i m_i + I_i \quad (i = 1, n) \quad (1)$$

上式を離散的に表現し、それを行列で表現すると、

$$(-\alpha_{i-1} dt, 1.0 - \alpha_i dt) (m_{i-1}(t+dt), m_i(t+dt))t = I_i dt + m_i \cdot t \quad (i=1, n) \quad (2)$$

上式はあるプロセスの単位時間流入量フラックスが流出元の質量に比例する係数で表されると仮定して、そのシステムの任意時間後の物質量を推定するものである。ここで、速度係数 $\alpha$ はそれぞれのプロセスにおいて製造、消費あるいは廃棄される種類ごとに計算されたものを加算して表される。すなわち、主要製品の種類を $k$ とすると、 $\alpha_i \cdot m_i = \sum \alpha_k \cdot m_k$  ( $m_i = \sum m_k$ ) となり、各プロセスでは必要な場合には以上のような操作を行う。

ところで、各過程での実測値や経験値に基づいて随時修正や追加も可能であるようなアルゴリズムが構築できればその有効性は非常に高くなる。もちろんそのためには廃棄物内化学物質の環境移行モデルを構成するプログラムが可塑性に富んだものでなければならない。そこで、廃棄物ライフサイクルにおける化学物質の環境移行モデルを Microsoft Excel のシート上で構成した。Microsoft Excel では入力値はすべて Microsoft Excel のセル内に格納させ、あるセルの値の変更をすべてのシステムにわたって書き換えることなく、関連する情報の変更を環境移行モデルに反映させることが可能だからである。

また、本環境移行モデルは物質の単位時間移動量（速度フラックス）をもとに構築した。その理由は廃棄物内化学物質の環境移行モデルの各プロセスは時々刻々変化しており、定常的な状態はありえないと予想されるが、各時刻での単位時間移動量（速度フラックス）の釣り合いについてはある種の規則が存在しているとしても、一般性を失わないからである。

### (3) 途中経過

現在、上記の S F A に基づいた環境移行モデルを鉛について解析中である。しかし、それぞれの過程あるいは要素（Excel のシート上のセル）はその下に生産される部品や製品をぶら下げており、これらの物質中に含まれる鉛の量を部品や製品ごとに加算して積み上げることが必要となる。いわゆるインベントリ解析となる。この作業はやっかいで現在のところその作業が終了していないので、以下のような途中経過を示すこととする。まず大まかな鉛のフローを図1のシステム構成に沿って求めた（図2）。示されている数値は現在分かっているものである。図によると新鉛は年間約 32 万トン生産され、これに故・くず鉛の再生によって 14 万トンが加わり、マスフローが起こっている。現在のデータ収集で、部品生産量は把握できているが、それが電気製品など商品生産に移行する段階になるとデータの収集がうまくいっておらず、フローを明らかにすることができなくなっている。しかし、鉛の需要の約 6 割が蓄電池であること、また回収が原材料の約 3 割であることを考えると、蓄電池の回収が極めて重要な課題となっている。一方、需要の多いと思われる電気製品中の鉛は、テレビのブラウン管の需要が 2 万トン程度、その他の電化製品（基盤中）は高々 100 トン程度であり、メインフローとしての取り扱いは不要であることが把握されている。しかし、はんだが約 2 万トン消費されており、これらはどこかの廃棄系に流れているので、さらに調査が必要である。また、プラスチックの安定化材料として、あるいは塗料として無機薬品が 6.8 万トンの需要があり、これらのフローも重要となる。ところで、以上のデータ収集から現段階では廃棄物中の鉛を予測することができないところであるが、最終処分される焼却灰中の鉛の存在量から可燃ごみ中の鉛の量を予測するとともに、中村ら<sup>5)</sup>によって出された可燃ごみ中の鉛のデータより、一般廃棄物中の鉛のフローを予測した。表1は家庭ごみ注の

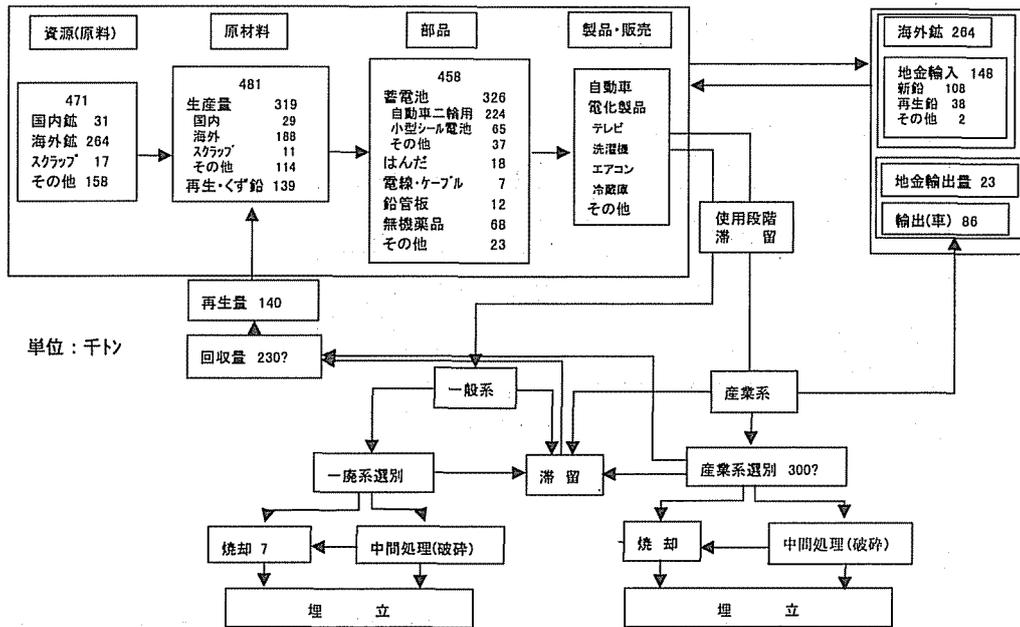


図2 鉛のマスフロー

鉛の由来からごみ中の鉛の総量を予測したものである。その結果、家庭ごみ中には約 78g/トンの鉛が含まれ、年間 (H5 実績) 2,820トンの鉛が焼却灰となって最終処分される。一方、今度は実測された焼却灰から焼却施設から排出される鉛の量を推定した。その結果、底灰から年間 4540トン、飛灰からは 2640トン、総量 7200トン余りの鉛の排出が予想され、ごみ量からの推定値の 2.5 倍となる。

表1 家庭ごみ中の鉛の含有量と寄与率(中村ら<sup>5)</sup>)

	含有濃度 mg/kg, g/kg	発生量 g/t ゴミ	寄与率 %	
小 頻 度 排 出	小型シール鉛電池 *1	650 g/kg	21	27.4
	鉛チューブ	970 g/kg	13	17
	クリスタルガラス製品 *1	270 g/kg	26	33.9
	小型家電製品(プリント基板)	77 g/kg	5	6.5
	グロー電気	120 g/kg	2.3	3
	電球口金型蛍光ランプ *1	78 g/kg	1.3	1.7
	電球	5.7 g/kg	0.54	0.7
	小 計	-	4.14	5.4
	塗料 *1	710 g/kg	0.09	0.1
	乾電池 *2	526 g/kg	0.5	0.7
中 計	-	69.7	91	
日 常 排 出	紙類	737	1.66	2.2
	プラスチック類	17.2	1.86	2.4
	繊維類	11.2	0.39	0.5
	ゴム類	47	0.06	0.1
	皮革類	168	1	1.3
	ガラス類	2.5	0.13	0.2
	金属類	3.4	0.08	0.1
	陶磁器類	240	0.43	0.6
	草木・木片類	19	0.47	0.6
	厨芥類	4.5	0.46	0.6
	その他	17	0.39	0.5
中 計	-	6.93	9	
由来合計	-	77.66	100	
家庭ごみ由来総Pb発生量	-	2820		

:g/kg \*1:estimated \*2:average  
注 H5 年焼却量実績量 36,169 千トン/年より鉛の総量を求めた。

った。家庭ごみからの推定は現在のところ誤差が大きいことが予想されるが、SFAを基により正確な鉛の排出量が求まるものと期待している。

表2 焼却施設からの鉛の発生量

焼却施設からの鉛の発生量		Pb濃度	Pb発生量
含水率:25%	焼却灰発生量	95%信頼区間	
	(×1000t/y)	mg/kg	t/year
底灰	6055	999	4540
飛灰	2170	1620	2640
排ガス(約1%として)			45
年当たりのPb発生量			7225

注 底灰は H5 年度実績より、飛灰は H5 年焼却量実績量 36,169 千トン/年の2%と仮定して求めた。また、鉛の濃度は 95%信頼区間濃度を使用した。

## 5. おわりに

サブスタンスフローアナリシス SFA のためのモデルを構築し、鉛について現段階で利用できる情報の範囲で解析を試みた。詳しくは発表時に報告したい。

有害物質の適正管理を検討する場合、考えられる処理処分やリサイクルにオプションに関して廃棄段階から最終処分までの全過程における有害物質のマスフロー、環境移行量(負荷)、資源・エネルギー消費のインベントリ解析が理想的だとされ、世界各国で解析が進められている。しかし、廃棄段階以降のいわゆるエンドパイプ的な政策ではもはや抜本的な解決は見いだせないことは誰しもが認識している。廃棄物処理システムだけでなく、製品の生産段階まで遡って議論し、適正管理システムを構築することが求められている。

また今日、特別管理廃棄物マニフェストの電子情報化や有害化学物質およびそれを含む有害廃棄物の排出・移動登録制度 PRTTR などの情報管理システムが議論されており、これらは LCA や SFA などの廃棄物管理システムの支援システムとしての機能が期待されている。

- 1) Frishche, R. et al. (1982). Criteria for Assessing the Environmental behavior of Chemicals: Selection and Preliminary Quantification. *Ecotoxi. Environ. Saf.* 6(3), pp.283-293
- 2) Conway, R.A. et al. (1981). Entry of Chemicals into the Environment. In *Environmental Risk Analysis for Chemicals*. Van Nostrand Reinhold Comp.
- 3) Ester, van der Voet et al. (1994). Cadmium in the European Community: A Policy- Oriented Analysis. *Waste Mana. & Research.* 12, pp.507-526.
- 4) 例えば、LCA のすべて—環境への負荷を評価する—(1995)、(社)未踏科学技術協会およびエコマテリアル研究会編、工業調査会発行
- 5) 中村一夫(1994). 製品ライフサイクルからみた飛灰の性状—清掃工場における鉛、カドミウムの由来と挙動—、*廃棄物学会誌*, Vol. 5, No. 1, pp. 60-68