

(18) 多属性をもつ鉛利用の評価に関する研究

— 消費にともなう金属の排出と蓄積に関する研究（その2） —

大阪大学工学部

末石富太郎，盛岡 通
○植田 和弘，右田 順一

1 はじめに

金属の利用は、人間生活に種々の効用をもたらしているが、同時に環境中の重金属濃度の上昇に派生する負の効用の源にもなっている。廃棄物処理・処分場における重金属汚染の発生等の重金属含有製品の廃棄による汚染は、生産工程には問題がなく消費者の要請によって生産されるという側面を持つがゆえに、特定の工場または鉱山からの排水による汚染とは問題の性格が異なる。それゆえ、こうした問題に対応する物質管理計画が必要となる。廃棄物の再生利用は、枯渇性資源の有効利用の観点からも、そうした物質管理計画の骨子をなすものであるが、それには再生処理技術の開発とともに、金属含有物質の利用と廃棄の仕方に対する評価と施策がなければならない。本文では、対象とする重金属として鉛を取り上げ、鉛利用の変化が資源再生、環境汚染とどう関係しているかを示した後、鉛利用の評価に R. L. Keeney らによって開発された多属性効用関数法¹⁾を適用した結果について報告する。

2 鉛利用の変化と資源再生・環境汚染

表1は、鉛の加工品目別の主要用途と鉛含有率、国内需要量（1977年）、平均廃用年数を示している。また、図1は、鉛の年間用途別供給量の経年変化を示している。鉛の需要は、全体としては伸びており、その原動力はバッテリーと無機薬品である。1950年代後半は、電線を中心にバッテリー、無機薬品、鉛管板が漸増していったが、1960年代に入る

表1 鉛の加工品目別主要用途と平均廃用年数

	需要量	鉛含有率	主 要 用 途	平均廃用年数
I バッテリー	12.0 ^{万t}	70 %	自動車、列車、船舶	2.3 ^(年)
II リ サ ー ジ	4.5	93	塩ビ安定剤、乾燥剤	1～6
III 鉛 管 板	4.3	90～	水道管、化学工業用	5～35
IV 電 線	2.8	90～	電話ケーブル	5～20
V は ん だ	2.5	40～80	製缶用、機械工業	3～10
VI 黄 鉛	2.0	90	黄色顔料	1～6
VII 鉛 丹	1.5	90	うわ薬、コム着色	1～6
VIII 活 字 合 金	0.6	60～80	印字用鉛板、普通活字用	2.0

と、塩ビの進出で鉛管板が頭打ちとなり、バッテリーと電線が主体を占めた。1960年代後半は、アルミによる代替で電線がほぼ半減し、自動車産業の隆盛でバッテリーが大きく伸びた。そして生活の高度化をうつした多くの用途をもつ無機薬品の伸びによりバッテリーと無機薬品とで鉛消費の60～70%を占める現状に至っている。²⁾

鉛利用は平均廃用年数の短い用途へと変化してきており、鉛利用総量の増加や他の諸要因ともあまって、①鉛資源の再生、②鉛の消費による環境への鉛放出、の2つの側面において顕著な変化をもたらした。

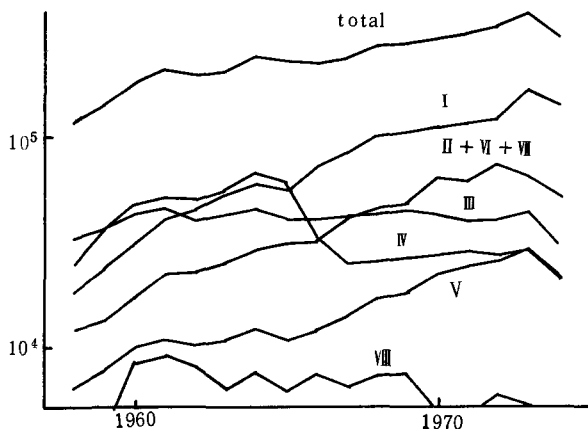


図1 鉛の用途別供給量の経年変化

図2は、鉛の再生量、再生率の経年変化を示している。図中の鉛廃用量は、国内供給量 $I(t)$ と廃用率関数 $f(\tau)$ とから、 $O(t) = \int I(t-\tau) f(\tau) d\tau$ で推定した。³⁾ 技術的限界再生可能量とは鉛再生

産業の現行技術によって再生可能な廃用鉛全量を示している。現実再生率および技術的限界可能再生率はそれぞれ、 $\text{現実再生率} = \text{現実再生量} / \text{鉛廃用量}$
 $\text{技術的限界可能再生率} = \text{技術的限界可能再生量} / \text{鉛廃用量}$ で算出した。

鉛管板、電線等の再生可能な用途に対して、リサージ、黄鉛、鉛丹等の再生不可能な用途への使用量が相対的に増加してきたため、技術的限界可能再生率は漸減傾向にある。技術的限界可能再生量と現実再生量とのギャップは大きくなる一方であり、現実再生率の低下傾向は著しい。技術的限界可能再生量と現実再生量とのギャップは、鉛の利用が再生可能な用途であっても、社会経済的要因で回収再生されないことから生まれるものであり、鉛利用用途の物質的な評価と社会経済的評価に乖離があることを示している。具体的には、15年程前までは各家庭を回って金属くずを回収していた業者があったが、現在ではほとんどなくなり、家庭や小さな事業所等で発生する鉛くずは回収されなくなっている。

鉛の消費過程からの環境への鉛放出量は、環境への鉛放出量＝鉛廃用量－鉛再生量で推定できる。環境への放出量は放出の形態、環境での現存状態も様々であり、直ちに汚染量と等しくおくことはできないが、潜在廃棄物と考えられる現存製品中の鉛よりは汚染に近い状態にある。1960年から1974年までの環境への放出量がすべて表層10 cmの土壌を日本全国で平均的に蓄積したとすれば、土壌中鉛濃度は27 ppm増加する。これは、通常バックグラウンド鉛濃度10 ppm⁴⁾よりも数倍大きい。再生が技術的限界可能再生量まで増加しておれば、環境への放出量は前述の45%まで減少していた。また、各用途の廃用年数が表1の平均廃用年数の最も長い値になったとすれば、環境への放出量は30%減少する。

3 多属性をもつ鉛利用の評価へのMUF法の適用

鉛の有効利用は、それぞれの用途において、生産者、消費者、再生業者等の利益集団別に評価が異なることにも示されるように、本来多属性を有しており、鉛をその用途に使うことがどんな意味を持っているか、どんな影響をあたえるか、鉛をどの用途に使うのが満足度が高いか等を検討するには総合評価が必要である。本研究では、多重属性効用関数法(Multiattribute Utility Function Method MUF法)を総合評価の手法として適用し、鉛利用の評価を行ない、環境、資源、経済とかかわる物質管理施策の材料を提供することを目的としている。

○MUF法の特徴と基本的構造、手続き^{5) 6)}

多重目標と不確実性の問題を明示的に入れた選好構造をもつ意思決定分析の4段階として、①問題の構造

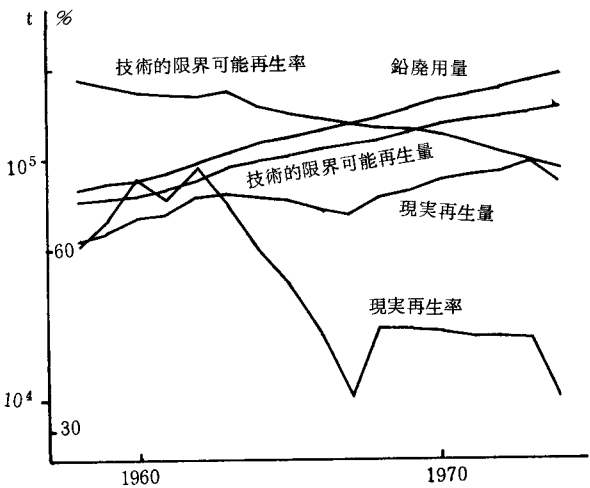


図2 鉛再生量、再生率の経年変化

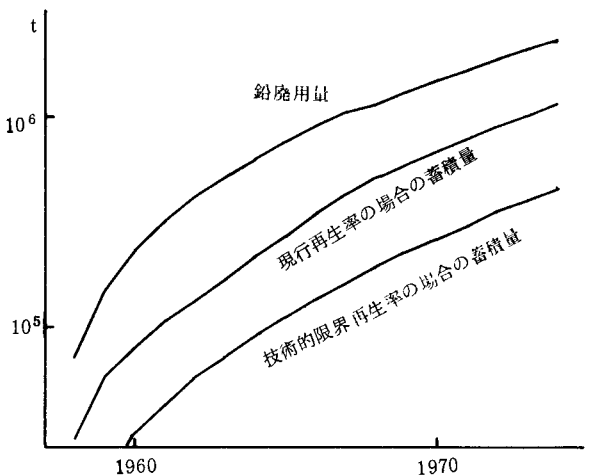


図3 鉛の消費による環境への放出量の経年変化

化；意思決定者が問題を明確にし、目的と、目的の効果を測定するための属性をはっきりさせる。②含まれている不確実性の数量化；各選択案の結果が得られるであろうと考える不確実さを確率で評価する。③意思決定者が考える選好の数量化；意思決定者の効用関数を評価すること。このときの効用関数は、 $U(x) = U(x_1, x_2, \dots, x_n)$ と一般に表わされ、引数は n 個の属性の水準を示すベクトルとなるので多重属性効用関数と呼ばれる。④選択案（代替案）の評価；各代替案の期待効用の計算と感度解析を行なうことが必要である。⁷⁾ MUF法は以上の4点を含むと同時に、総合評価の抽出に至るまでの手順と、最終的な総合評価を構成する諸要素の評価構造が他の評価手法に比較して明確である。

鉛利用の評価にMUF法を適用するにあたって必要となる解析手続きは、(1) Scenario Writing；研究目的にしたがって、第三者にも十分納得、理解できるように対象の状況ならびに研究しようとする問題を多面的に描く。(2) The Screening Process；(1)により明確になった研究対象、目的を統一的に理解できるように整理する。Issues：どのような視点で対象を把握するか。Attributes：Issuesの中で、どのような属性が特徴的であるかを抽出する。Measures：各属性のレベルを適当な尺度を用いて決定する。Criteria for Inclusion

：因子の評価規準を決定する。の4項目を決定する。鉛利用の評価における階層構造を表2のように設定した。評価視点および明らかにする内容は次のとおりである。①3rd levelでは、ある用途への鉛利用が総体としてどの程度の効用を与えているかを測定する。②2nd levelでは、ある用途への鉛利用に対する要求の特性において異なると考えられる生産者、消費者、再生業者に分割した。生産者における目標は利益最大化であり、消費者にとっての目標は、消費者の効用最大化である。また、再生業者にとっての目標は再生利用の促進である。生産者、

表2 鉛利用の評価における階層構造

3rd level	2nd level	1st level	Attribute		
			経済	環境	資源
ある用途への鉛の有効効用 U	生産者 U _P	生産 U _A - X ₁	X ₂		
		販売 U _B - X ₃	X ₄	X ₅	
	消費者 U _Q	購買 U _C - X ₆	X ₇	X ₈	
		使用 U _D - X ₉	X ₁₀	X ₁₁	
		廃棄 U _E - X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	
		回収 U _F - X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	
	再生業者 U _R	再生 U _G - X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	
		販売 U _H - X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	

消費者、再生業者がそれぞれある用途への鉛利用に対してどの程度の効用をえているかを測定する。③1st levelでは、生産者を生産する行為と販売する行為に分割した。それぞれの目標としては生産性増大と販売増大とした。消費者は購買、使用、廃棄という行為に、再生業者は回収最大化、再生効率化、再生品販売増大を目標とする回収、再生、再生品販売という行為に分割した。④各行為に対し、環境、資源、経済の視点から、それぞれの属性を設定した。⑤ある用途への鉛利用に対する効用の満足度が高められるためには、どのような施策が必要になるかを検討する。⑥どの用途への鉛利用が現時点において効用の満足度が相対的に大きいかを明らかにする。⑦鉛利用を生産と消費の観点からだけで、再生の観点を無視した場合、各用途への鉛利用に対する効用の相対的大きさがどのように変化するかを明らかにする。2nd level以下の再生業者に関する部分を除いて、鉛利用の期待効用を算出した。(3) Establishing the Objectives and Measures of Effectiveness；以上のプロセスを通じてえられた属性について、それぞれに対する望ましきの度合いがBest, Worstの状態を決める。(4) Determining the Preference structure；属性の選好構造を多重属性効用関数の形において決定するプロセスを示す。Determining the Multiattribute Utility Function：効用関数の計測を行なう場合には、まずはじめに属性間において、選好独立と効用独立がなりたっていないなければならない。^{注1)}ある X_i, X_j が他の属性に対して選好独立かつ効用独立であるならば、次の形の効用関数表現が可能であることがR. L. Keeney らにより証明されている。⁸⁾

- 加法型効用関数 $U(X) = \sum_{i=1}^n K_i U_i(X_i)$
- 乗法型効用関数 $1 + K U(X) = \prod_{i=1}^n \{ 1 + K K_i U_i(X_i) \}$
- ここで U と U_i は 0 から 1 のスケールの効用関数である。
- K, K_i は Scaling Constant: $0 < K_i < 1, K > -1$
- $n \geq 3$

Assessing the Single - Attribute Utility Functions: 効用関数を決定するために、属性における Worst level, Best level とともに $U_i \{ x_{i,50} \} = 0.5$ となる $x_{i,50}$ の値を決める。Evaluating the Scaling Constants : 全属性を Worst level におき、他の属性を Worst level におく条件をもつことで、全属性の中で一つだけ Best level にしたいものを選ぶ。すべての属性の順序づけが決定されるまでこの操作をくりかえす。次に、各 K_i の相対的大きさを定めるために、属性間のトレードオフ値を測定する。Specifying the Utility Function : 数個の属性の Scaling Constant の順位づけを行ない、その中で第 1 位の Scaling Constant についての期待効用を求める。その値が求まったらその他の属性とのトレードオフの値を測定して相対的な大きさを求めて、つぎに各々の Scaling Constant を求める。設定した属性、効用水準および測定した Scaling Constant の値を表 3 に示す。また、属性間のトレードオフ値測定の例を図 4 に、効用関数の例を図 5 に示す。Worst level, Best level の値は現実の測定値より決めた。

Scaling Constant の測定を K_1, K_2 を例に述べる。属性 X_1 と X_2 の間には図 4 のようなトレードオフの関係がある。A 点について $1 + K U_A [X_1, X_2]$

$$= [1 + K K_1 U_1(0.394)] [1 + K K_2 U_2(4.0)] = 1 + K K_2 U_2(4.0) \cdots \textcircled{a}$$

$$\text{B 点について } 1 + K U_A [X_1, X_2] = [1 + K K_1 \times U_1(1.357)] [1 + K K_2 U_2(20.0)] = 1 + K K_1 \cdots \textcircled{b}$$

$$\therefore K_1 = K_2 U_2(4.0)$$

K_2 の値は $U_A(X_1 = \text{worst}, X_2 = \text{best})$ と無差別になるような属性の組みあわせ $U_B(X_1 = \text{best}, X_2 = \text{best})$, $U_W(X_1 = \text{worst}, X_2 = \text{worst})$ で、 U_B への確率を求めることで決定する。 $K_2 = 0.58, K_1$ の値は、 U_2 の効用関数(図 5 参照)から $U_2(4.0) = 0.93$ を算出し、 $K_1 = 0.58 \times 0.93 = 0.539$ で決定する。

各属性間の統合は、表 2 に示したように 3 段階あるが、方式は同様である。

$$U_A(X_1, X_2) = \frac{1}{K} \{ [1 + K K_1 U_1(X_1)] [1 + K K_2 U_2(X_2)] - 1 \}$$

ここで $1 + K = (1 + 0.539 K)(1 + 0.580 K)$

$$\therefore K = -0.380 \quad \therefore U_A(X_1, X_2) = -\frac{1}{0.380} \{ [1 - 0.205 U_1(X_1)] [1 - 0.220 U_2(X_2)] - 1 \}$$

4 鉛利用の評価結果と考察

鉛利用の代表的な用途である蓄電池、無機塗料、鉛管について MUF 法を適用した結果を表 4 に示す。評価結果の特徴は、つぎのとおりである。

表 3 属性、効用水準および Scaling Constant

	Attribute	$U(x_i)=0$	$U(x_i)=0.5$	$U(x_i)=1$	S. C.
X_1	鉛消費量前年比増加率	0.394	0.985	1.357	0.539
X_2	鉛 1t 使用時廃棄鉛量 (Kg)	20.0	14.0	0	0.580
X_3	製品使用数	0	0.5	1	0.322
X_4	製品汚染量 代替品の汚染量	2	0.98	0	0.520
X_5	廃用年数 物理的耐用年数	0.1	0.4	1.0	0.352
X_6	製品の価格 代替品の価格	10.0	1.0	0.76	0.316
X_7	製品の汚染量 代替品の汚染量	2	1	0	0.490
X_8	製品の寿命 代替品の寿命	0.9	1.1	3.0	0.343
X_9	製品の使用価値 その用途の最高使用価値	0.3	0.65	1.0	0.227
X_{10}	使用期間全体の減失鉛量 製品使用量	1.0	0.3	0	0.720
X_{11}	製品の寿命 代替品の寿命	0.88	1.21	3.0	0.454
X_{12}	スクラップ販売価格 (円/Kg)	0	45	1298	0.486
X_{13}	再生率	0	0.3	1	0.660
X_{14}	使用年数 物理的耐用年数	0.01	0.51	1.0	0.607
X_{15}	販売価格 スクラップ購入価格	0	1.119	3.113	0.436
X_{16}	スクラップ置場必要空間 鉛量 (cm ³ /Kg)	10 ⁵	3380	100	0.620
X_{17}	製品鉛含有率 (%)	0	3.2	100	0.496
X_{18}	製品鉛含有率 (%)	0.01	95.0	100	0.813
X_{19}	再生鉛 1t 生産当汚染量 (トン)	10	1	0	0.580
X_{20}	再生鉛 1t 生産当廃物鉛量 (トン)	0.99	0.28	0.001	0.522
X_{21}	再生品の質 / 価格 新品の質 / 価格	0	0.98	1.65	0.329
X_{22}	再生品汚染量 代替品汚染量	1.9	0.92	0	0.570
X_{23}	再生品の寿命 代替品の寿命	0.1	1.0	3.0	0.375

U_A ; 生産における効用の水準はどの用途も高い。 U_B ; 販売における効用の水準は蓄電池で高く、鉛管では 0.378 と低い水準にとどまっている。これは鉛管が塩ビ管等に代替されている状況の反映である。 U_D ; 鉛管、蓄電池は使用中の減失が他に比べて少なく満足度は高い。 U_E ; 廃棄においては、再生

率が高い蓄電池、鉛管がやや満足しているのに対し、再生されておらず、スクラップとしての価値が低い無機塗料では、0.455 と満足度は低い。 U_F ; 回収における効用の水準では、スクラップ購入価格に対する販売価格の比が蓄電池や製品中の鉛量の多い鉛管は比較的高い満足度を示しているが、鉛含有率の低い無機塗料は 0.001 ときわめて低い状態にある。 U_G ; 鉛含有率が高く、鍋で再生することができる鉛管は効率がよいことを反映している。蓄電池は再生までの前処理で汚染が発生しやすいが、鉛含有率は高く効用水準は比較的高い。 U_H ; 再生品の質が新品の質にきほど劣らない鉛管、蓄電池ではやや満足している状態にある。

蓄電池では、生産者、消費者、再生業者ともかなり高い満足度を示しており、鉛の利用用途としてすぐれていることがわかる。無機塗料には、生産者は 0.840 と高い満足度を示しているが、消費者は 0.566 と効用水準が下がり、再生業者からみた場合は、スクラップとして使っていない反映として 0.177 と満足度は低い。 U は生産と消費のみで鉛利用を評価した場合の効用値を示しており、蓄電池 > 無機塗料 > 鉛管の順になり、現状の鉛利用の変化傾向を示している。生産と消費に加えて再生の視点を考慮した場合は効用値 U を示し、蓄電池 > 鉛管 > 無機塗料の順になる。

補助金等の施策により、蓄電池スクラップの消費者からの販売価格を 50%引き

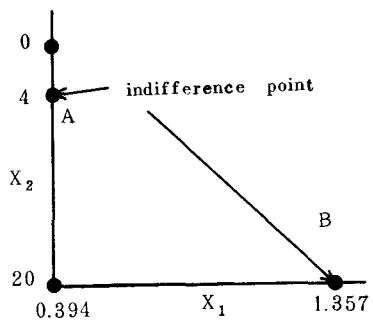


図 4 X_1 , X_2 のトレードオフ

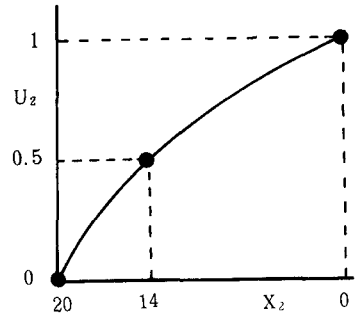


図 5 属性 X_2 の効用関数

表 4 各属性の値と効用水準

	蓄電池	無機塗料	鉛 管		蓄電池	無機塗料	鉛 管
X_1	1.103	1.115	0.995	U_1	0.619	0.633	0.512
X_2	3.6	0.1	1.5	U_2	0.938	0.998	0.980
X_3	0.98	0.60	0.20	U_3	0.980	0.600	0.200
X_4	1.0	1.1	1.0	U_4	0.488	0.434	0.488
X_5	0.767	0.755	0.266	U_5	0.881	0.875	0.301
X_6	0.98	1.0	9.8	U_6	0.511	0.500	0.022
X_7	1.0	1.1	1.0	U_7	0.500	0.450	0.500
X_8	1.1	1.3	2.0	U_8	0.500	0.667	0.938
X_9	0.84	0.65	0.72	U_9	0.764	0.500	0.596
X_{10}	0.01	0.20	0.02	U_{10}	0.979	0.631	0.952
X_{11}	1.1	1.3	2.0	U_{11}	0.380	0.566	0.880
X_{12}	63.0	0	135.0	U_{12}	0.542	0	0.645
X_{13}	0.62	0	0.58	U_{13}	0.798	0	0.767
X_{14}	0.767	0.755	0.266	U_{14}	0.763	0.751	0.263
X_{15}	2.444	0	1.207	U_{15}	0.890	0	0.532
X_{16}	1260	1	900	U_{16}	0.823	0	0.878
X_{17}	70.0	0.01	98.5	U_{17}	0.982	0.002	0.998
X_{18}	70.0	0.01	98.5	U_{18}	0.222	0	0.850
X_{19}	0.38	9.85	0.01	U_{19}	0.771	0.008	0.995
X_{20}	0.25	0.4	0.07	U_{20}	0.522	0.364	0.826
X_{21}	1.0	0.01	1.02	U_{21}	0.510	0.009	0.526
X_{22}	1.0	1.1	1.0	U_{22}	0.450	0.396	0.450
X_{23}	1.0	1.1	2.0	U_{23}	0.500	0.541	0.829
U_A	0.808	0.845	0.784	U_H	0.545	0.405	0.643
U_B	0.766	0.648	0.378	U_F	0.872	0.840	0.695
U_C	0.538	0.563	0.543	U_Q	0.727	0.566	0.706
U_D	0.809	0.648	0.853	U_R	0.747	0.177	0.848
U_E	0.854	0.455	0.741	U'	0.705	0.654	0.645
U_F	0.936	0.001	0.901	U	0.821	0.510	0.751
U_G	0.670	0.194	0.937				

上げ、再生業者の購入価格を維持すれば、 $U_B = 0.869$, $U_Q = 0.734$, $U = 0.822$ に上昇する。また、蓄電池の再生率が、 $0.62 \rightarrow 0.20$ になったとすれば、 $U_B = 0.724$, $U_Q = 0.699$, $U = 0.818$ になる。維持管理を徹底して、物理的耐用年数まで鉛管を使用すれば、 U は 0.774 になり、鉛管の価格を現在の 60% にまで下げれば、 U は 0.752 になる。使用場所の変更等で無機塗料の使用期間中減失鉛量を 5% におさえることができれば、 U_D , U_Q , U はそれぞれ 0.774 , 0.601 , 0.522 になる。

5 おわりに

鉛利用の評価に MUF 法を適用した。次のような問題点および課題がある。(1) MUF 法は評価構造手続きが比較的明確であり、現状の鉛利用の評価と施策の有効性を検討するのに適しているが、現実の物質管理を論じるには、属性効用水準決定の主観性等の問題点が残っている。(2) MUF 法を適用する際に必要な鉛利用に関する基本情報が不足しており、物質管理計画作成には物質利用データバンクが必要である。(3) それにともない効用水準の決定は専門家間でも振幅が大きい。また、効用水準決定の合理的方式の開発が望まれる。(4) 物質利用データバンクには、価格、販売数、再生率や廃物量等の値が絶対値としてもまた代替品との相対値としても記録されたいうに、物の使い方や社会・経済的な各種の施策および技術開発がそれらの値をどのように変化させるかについての情報も必要である。(5) 各集団の特性を示す属性は、相互に関係がある場合が多く、独立だとは限らない。この点で、本研究も不十分点を残しており、今後独立でかつ特性を表す属性の選択に努力がはらわねばならない。

最後に、本研究の遂行にあたり、資料収集、討議の過程で御協力頂いた日本鉛亜鉛需要研究会部長児玉伊智朗氏、西日本鉛再生精練組合 国樹定一氏はじめ多くの方々に謝意を表する。

注 1) 選好独立: $[X_i, X_j]$ の組合わせについての選好順序が、他の属性の固定したレベルに依存しないならば、これらの属性に対して選好独立であるという。効用独立: 属性 X_i における lotteries に対する選好順序が、他の属性の固定したレベルに依存しないならば、属性 X_i はこれらの属性に対して効用独立であるという。

【参考文献】 1) R.L. Keeney; A Utility Function For Examining Policy Affecting Salmon In The Skeena River, IIASA RM-76-5 Jan. (1976)

2) 内山直樹; 日本における鉛需給、鉛と亜鉛 Vol. 60 (1974)

3) 末石富太郎, 盛岡 通; 消費にともなう金属の排出と蓄積に関する研究 (その 1、亜鉛の消費と底泥中の現存について) 第 12 回衛生工学研究討論会論文集 (1976)

4) H.J.M. Bowen; Trace Elements in Biochemistry, Academic Press. London (1966)

5) R.L. Keeney; Energy Policy And Value Tradeoffs, IIASA, RM-75-76 Dec. (1975)

6) Hidekazu Horiyama and Kenichi Nakagami; "Environmental Assessment of Osaka City Area Using Multiattribute Utility Theory" Kyoto Institute of Economic Research, Discussion Paper, KIER No 126. 1978. 3

7) Raiffa, H; Decision Analysis, Addison-Wesley, Reading Mass (1968) 宮沢・平館訳 “決定分析入門” 東洋経済新報社 (1972)

8) R.L. Keeney; Multiplicative Utility Functions, Oper. Res. 22. 22-34 (1974)

【参考資料】 ○ (通) 調査統計部編; 非鉄需給統計年報 ○ 日本鉛亜鉛需要研究会; 鉛ハンドブック ○ 日本無機薬品協会; 無機薬品要覧 ○ (財) 流通システム開発センター; 昭和 50 年度再資源化計画非鉄金属くず実態調査報告書 ○ 産業新聞; 日刊金属特報非鉄原料鉄スクラップ相場欄 ○ 日本規格協会; 1971 JIS ハンドブック 非鉄 ○ 国際連合・国際鉛亜鉛需要研究会編、日本鉛亜鉛需要研究会; 鉛と亜鉛の消費に及ぼす諸要因の検討 ○ 顔料技術協会; 顔料 ○ (通) 調査統計部編; 機械統計年報 他