

有害物質を含む種々の環境影響領域間の DtT 法による重み付け係数作成

Development of weighting factors for impact categories including hazardous materials
based on Distance to Target method

平井 康宏* 酒井 伸一* 高月 紘*
Yasuhiro Hirai* Shin-ichi Sakai* Hiroshi Takatsuki*

ABSTRACT: The Distance-to-Target(DtT) method, which weights impact categories according to their distance between current and target impacts, is widely used in the Life Cycle Impact Assessment. In Japan, the data requirement on normalization values has restricted the development of weighting factors based on the DtT method to "easy" substances, such as CO₂, NO_x and SO_x of which emission data are readily available. Concerning the characterization of toxic substances, modeling of fate and exposure was not included as well. In this study, weighting factors for four impact categories including human toxicity were developed. Based on the Keidanren PRTR and estimation on other sources (coal combustion, waste incineration, use of pesticide, application of phosphate fertilizer and sewage sludge), normalization value for heavy metals in Japan was estimated. Multimedia fate and exposure model (Mackay Level III model) was applied to calculate the characterization factors for toxic substances (PCDD/DF and heavy metals). It was found that the coal combustion and the waste incineration, which are not covered by Keidanren PRTR, contribute significantly to the annual emission of heavy metals in Japan. Implication of the difference between the reduction factor for PCDD/DF and that for heavy metals are discussed.

KEYWORDS: Heavy metals, Distance to Target, Weighting, LCIA, Toxicity

1. はじめに

製品やサービスの環境面の評価において LCA が有用な手法であると認識され、ISO で標準化が進められている。LCA の構成要素中もっとも主観的要素が強く規格化が困難と見られていたライフサイクル影響評価(LCIA)についても ISO14042 として規格が策定された。しかし、同一影響領域内での影響のモデル化を行う特性化手法や異なる影響領域間の重み付け手法については、いまだ研究・開発の途上にあると述べられており、さらなる研究が望まれる。これまでに開発された重み付け手法としては、1) 代理指標、2) パネル法¹⁾、3) Distance to Target (DtT) 法²⁻⁴⁾、4) 対策コスト法⁵⁾、5) ダメージ関数法⁶⁾、などがある。このうち DtT 法は、各環境影響領域に対応する政策目標値と現状の実際値との乖離を重み付け係数として用いる手法である。適用にあたっては対象とする物質の年間排出量を把握することが必要なため、日本を対象とした DtT 法^{3,4)} では、データの入手しやすい温室効果ガスや富栄養化物質などに適用が限られ、重金属類などは対象からはずされてきた。また、複数の有害物質を LCIA で扱う場合には、物質間の相対的重要性の評価(特性化)が必要となるが、日本では EUSES(ヨーロッパ)や CalTOX(米国)に対応するような有害物質の評価モデルが利用可能な状況にないため、有害物質の特性化には放出後の移流・拡散・分解などの運命予測が組み入れられてこなかった⁷⁾。

そこで、本研究では、有害物質を含む種々の影響領域間の重み付け係数を DtT 法により作成することを目的として、日本における有害物質(ダイオキシン類および重金属類)の年間排出量を経団連 PRTR 調査⁸⁾

* 京都大学環境保全センター Environment Preservation Center, Kyoto University

およびこれに含まれない発生源を対象とした推定に基づいて算出した。また、Mackay 型の多媒体運命予測モデル⁹⁾を用いて、有害物質の特性化係数（毒性統合係数）を作成した。

2. 重み付け係数の作成

2.1. 環境影響領域および対象物質の選定

本研究においては、廃棄物処理システムの評価を念頭に、対象とする環境影響領域を1)地球温暖化、2)酸性化、3)埋立地の逼迫、4)有害物質による健康影響、の4カテゴリーとし、各影響領域に対応する対象物質として表1に示したものを選んだ。各影響領域内での特性化係数には、地球温暖化においてGWP100年値を、酸性化においてAP値(Acidification Potential)²⁾を用いた。各影響領域における年間負荷量としては、国内での排出量を対象とし、入手出来た最新のデータを採用した。有害物質の特性化係数および年間排出量については、2.2、2.3節で述べる。各環境影響領域における目標負荷量は、環境条約や法律等を参考に、表1のように設定した。同一の環境影響領域内において対象物質毎に異なる削減率が設定されている場合には、各対象物質毎の目標負荷量を各削減率で算出した後に特性化係数で加重合計し、当該環境影響領域全体としての目標負荷量を算出した。この点についての含意は3.2節で検討する。目標は2010年までに達成すべきものとして選んだ。NOxの総量削減率(1990年比25%減)は2000年度に達成することを目指して設定されたものであるが、現状では達成は困難であると考えられるため、これを採用した。重金属類の削減率あるいは目標負荷量については、これを対象としたものが見あたらなかったため、経済界の設定した自主管理計画対象12物質(ただし、これら12物質の中には本研究で対象とした重金属類は含まれていない)での削減目標「2000年に1995年比3割削減」⁸⁾を参考に、現状より3割削減と設定した。

DrT法による統合評価値は下式により算出される。したがって、各影響領域に対する重み付け係数は、目標負荷量の逆数となる。

$$\text{統合評価値} = \sum Si / Ai \times Ai / Ti = \sum Si / Ti \quad (\text{式1})$$

Si: 検討対象のシステムが持つ、環境影響領域 i における特性化後の負荷量

Ai: 環境影響領域 i における特性化後の年間負荷量の実際値

Ti: 環境影響領域 i における特性化後の年間負荷量の目標値

表1: 評価対象とした環境影響領域および対象物質と日本における年間負荷量、目標負荷量

環境影響領域	対象物質	特性化係数	単位	年間負荷量	目標負荷量	削減率
地球温暖化	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆	GWP100年値	百万ton-CO ₂ eq	1231(1997)*1	1057	1990年比-6%#1
酸性化	SO _x , NO _x	AP値	千ton-SO ₂ eq	3360(1990)*2	2891	SO _x 1990年維持#2 NO _x 1990年比-25%#3
埋立地の逼迫	埋立地消費量	-	百万m ³	81(1996)*3	40.5	1996年比-50%#4
有害物質	ダイオキシン類, As, Cd, Cr, Hg, Pb, Zn	図1参照	千ton-ref	810(1998)*4	540	DXN類 1997年比-90%#5 重金属類 1998年比-30%#6

*1: 年間負荷量にはバイオマス由来のCO₂排出量は含まない。*2: AP値は、SO_x=1, NO_x=0.7。年間負荷量は、産業連関表および排出原単位を用いた電中研による推計値。SO_x140万トン、NO_x284万トン。外洋輸送を含む。*3: 一般廃棄物と産業廃棄物の最終処分量より、ごみ比重を1.0として算出。*4: 一部1996年度を対象に推定

#1: 京都議定書 #2: 現状で環境基準は達成 #3: 東京都特別区等でのNO_x総量削減計画 #4: ダイオキシン類対策特別措置法 #5: ダイオキシン類対策特別措置法 #6: 産業界自主管理計画対象物質に対する削減率を準用

2.2. 多媒体運命予測モデルを用いた有害物質の特性化係数の作成

本研究では、オランダ CML と RIVM の共同プロジェクト¹⁰⁾の手法にならって特性化係数を作成した。すなわち、有害物質のモデルによる摂取量予測値(PDI)と一日耐用摂取量等(TDI)の比率に基づいて有害性を評価し、1,4-ジクロロベンゼンの大気への排出を参照物質とした特性化係数を作成した(式2)。

$$HTP_{\text{subs,comp}} = \left[\frac{PDI_{\text{subs,comp}}}{TDI_{\text{subs}}} \right] \left/ \left[\frac{PDI_{\text{ref,air}}}{TDI_{\text{ref}}} \right] \right. \quad (\text{式 2})$$

$HTP_{\text{subs,comp}}$ 有害物質 subs の環境媒体 comp への排出に対する特性化係数 (Human Toxicity Potential)
 $PDI_{\text{subs,comp}}$ 有害物質 subs の環境媒体 comp への排出による subs の予測一日摂取量 (Predicted Daily Intake)
 TDI_{subs} 有害物質 subs の一日耐用摂取量
 $PDI_{\text{ref,air}}$ 参照物質(1,4-ジクロロベンゼン)の大気への排出による参照物質予測一日摂取量
 TDI_{ref} 参照物質(1,4-ジクロロベンゼン)の一日耐用摂取量

モデルによる PDI の算出は、排出量を入力値として環境媒体中濃度を算出する部分と、環境媒体中濃度を入力値として摂取量を算出する部分との 2 段階に分けられる。前段の環境媒体中濃度の予測には Mackay レベル 3 モデル⁹⁾を採用した。Mackay モデルは有機化学物質を想定して構築されたものであるため、そのままでは重金属類を扱うことができない (通常の定式化では水のフガシティー容量を 1/H とするが、H=0 の重金属類では不定となる)。そこで、フガシティー容量にヘンリー定数 H を乗じた値を「換算フガシティー容量」とし、モデルの定式化を行った⁹⁾。モデルの地理スケールとしては日本全体を想定し、評価対象とする系は、大気、工業土壌、農業土壌、自然土壌、水系、底質の 6 つのコンパートメントにより構成されるとした。系外への物質の移流・拡散により有害物質の影響が過小評価されることを防ぐため、系外との物質のやりとりは行われないものとした。

生物濃縮-摂取過程のモデル化は US EPA¹¹⁾ および中央環境審議会¹²⁾によった。モデルの基本的な考え方は、生物濃縮係数を用いて食品中の濃度を算出し、一人一日あたりの摂食量を乗じることで、対象物質の摂取量を求める、というものである。食品としては、根菜、地上野菜、果物、穀類、牛肉、牛乳、卵、魚、を扱った。また、食品を通じた摂取の他、大気の吸入、土壌の直接摂食も暴露経路として考慮した。

化学物質の物性値、生物濃縮係数、人体毒性パラメータ、食品摂食量等は、各種資料¹¹⁻¹⁴⁾によった。

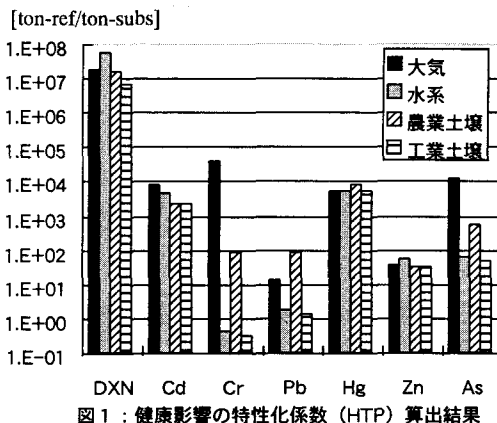


図 1：健康影響の特性化係数 (HTP) 算出結果

2.3. 有害物質の年間負荷量の推定

有害物質の年間負荷量としては、重金属類排出量およびダイオキシン類排出量を、2.2 節で作成した特性化係数 HTP で加重合計した値を採用した。ダイオキシン類の排出量は 1998 年度の排出インベントリーによった。重金属類については、第 3 回経団連 PRTR⁸⁾での公表値 (表 2) に加え、1) 農業散布、2) 石炭の燃焼、3) 廃棄物焼却、4) リン酸質肥料の使用、5) 下水汚泥の農地還元、による排出量を別途推計した。1) は、環境庁 PRTR 試行調査において非点源汚染からの排出として推計されている。2) ~ 5) については、重金属類の排出インベントリにおいて取り上げられているあるいは重金属排出による問題が指摘されているものの、経団連 PRTR 調査には含まれていない。上記より推定された日本における重金属排出量を表 6 に、HTP 値で加重合計した結果を図 2 に示した。各排出源からの推計過程は表 3 ~ 5 に示した。なお、本推計で対象としていない排出源としては、・自然起源の排出、経団連 PRTR 調査に参加していない事業所からの排出、蛍光灯の破損による水銀排出など使用・廃棄過程における排出、があり、本試算は過小評価である可能性が高い点に留意が必要である。

表2：経団連PRTR調査での重金属類排出量

[ton/年]	大気	水系	土壌
Cd	0	0	0
Cr	2	5	1
Pb	35	1	10
Hg	0	0	0
Zn	111	277	54
As	3	0	0

表3：肥料施肥による重金属類排出量

	肥料中濃度[mg/kg]		重金属排出量[ton/年]	
	リン酸肥料	下水汚泥	リン酸肥料	下水汚泥
Cd	10.1	2.15	24	0.45
Cr	29.7	48.85	72	10
Pb	12.2	51.75	29	11
Hg		2		0.42
Zn	89	1250.1	210	260
As		1.39		0.29

*リン酸質肥料使用量241万トン、下水汚泥農地還元量21万トン

表4：石炭（一般炭）の燃焼による重金属類排出量の推定

	As	Cd	Cr	Hg	Pb	Zn	単位
電力9社平均*1	2	0.1	2	2	6	10	μg/kWh
電力9社石炭火力*2	20	1	20	20	70	100	μg/kWh
フィンランドSB#	0.28-8.9	1.5	31	68	11		μg/kWh
フィンランドHB#	<6.5	0.25	0.39-8.3	0.25	0.1-6.7		μg/kWh
米国石炭火力##	30	1.7	33	27	33		μg/kWh
採用原単位*3	9	0.4	9	9	31	44	g/10 ⁹ kcal
国内年間排出量*4	4	0.2	4	4	13	18	ton/年

*1：松野ら日エネ誌 77巻pp.1162-1175(1998)石炭火発比率、石炭中の重金属含有量、排ガス処理での除去率をもとに算出。

*2：*1の原単位を1995年度の石炭火発比率8.75%で除し、石炭火発の発電量あたりに換算した値。*3：*2の原単位を単位換

算した値。1kWh=2250kcal *4：*3の原単位に国内での一般炭消費量412x10¹²kcalを乗じた値。原料炭の消費は含まない

#：L.A. Tapola et al. Fuel Processing Technology vol55. pp.13-34 (1998)

##：US EPA Study of Hazardous Air Pollution from Electric Utility Steam Generating Units (1998)

表5：廃棄物焼却施設からの重金属類排出量推計値

排出量の算出に用いた数値						重金属類排出量						
	重金属濃度[mg/kg]		重金属類の移行率#		排水基準	排出先	排ガス[ton/年]			排水[ton/年]		
	飛灰	主灰	排ガス	排水	[mg/L]	算出方法	煤塵量*1	移行率*2	採用値	移行率*2	排水基準*3	採用値
Cd	140	10	0.80%	0.042%	0.1	Cd	2.0	1.5	2.0	0.08	1.2	0.08
Cr	360	300	0.015%	0.046%	0.5	Cr	5.0	0.4	5.0	1.1	5.9	1.1
Pb	3000	950	0.41%	0.022%	0.1	Pb	42	32	42	1.7	1.2	1.2
Hg	4.2	0.39	12%	0.0028%	0.005	Hg	0.06	1.7	17*	0.0002	0.06	0.0002
Zn	13000	3300	0.062%	0.037%		Zn	180	19	180	12		12
As	20	5.2	0.052%	0.0015%	0.1	As	0.28	0.04	0.28	0.001	1.2	0.001

*1：焼却施設から排出される煤塵量（13,800ton/年、1996年度）に飛灰中重金属類濃度を乗じて算出。

*2：焼却残渣量（主灰703万トン、飛灰78万トン）、残渣中重金属類濃度、焼却炉での排ガス・排水移行率より算出。

*3：焼却施設での排水発生量（1200万m³）×排水基準濃度 *：谷川・浦野：廃棄物学会論文誌9巻pp.181-187(1998)

#：P.R. White et al.: Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory, Blackie Academic & Professional(1995)、中村一夫：廃棄物学会誌5巻pp.60-68 (1994)、A.Tukker: Int. J. LCA, vol.4, no.6, pp.341-351 (1999) の幾何平均値

表6：日本の重金属類年間排出量推定値 [ton/年]

	大気	水系	工業土壌	農業土壌
Cd	2.2	0.080	0	25
Cr	11	3.1	1.0	82
Pb	90	2.2	10	40
Hg	21	0.0002	0	0.42
Zn	309	289	54	524
As	7.3	0.0012	0	0.29

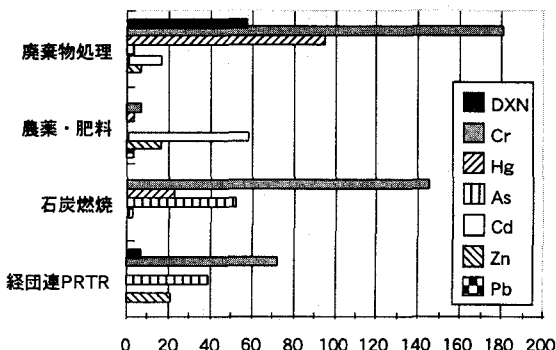


図2：ダイオキシン類および重金属類年間排出量 [1000ton-ref/年]

3. 結果と考察

3.1. 有害物質の年間排出量

重金属類の発生量を発生源別に見ると、経団連 PRTR に含まれない発生源、特に石炭の燃焼と廃棄物処理施設からの重金属類排出が経団連 PRTR と同程度かそれを上回る量の重金属類を排出していると推計された。PRTR 法においては、廃棄物処理施設からの化学物質排出量も報告されることとなっており、今後より正確な値が入手可能になると期待される。一方、石炭中の重金属類含有率は低いため、重金属類に関しては PRTR 法で対象となる製品の要件（1%以上、発ガン物質は 0.1%以上）には該当せず、PRTR 法施行後も十分な把握が行われないと考えられる。本試算で推定された石炭由来の重金属類排出量の大きさを考えると、何らかの対処（廃棄物処理施設と同様に石炭火力発電所を指定する、行政により排出量を推計するなど）をとることが望まれる。本試算では、産業活動に比較して農業・肥料の使用に由来する健康影響は低い傾向にあったが、対象物質として有機系の農業も含めた場合には、この評価は変わりうる。

健康影響に対する寄与を化学物質別に見ると、クロム、水銀、ダイオキシン類、砒素、カドミウムの影響が大きいと評価された。特に廃棄物処理および石炭燃焼からのクロムが大きな影響を持つと評価されたが、本特性化係数が六価クロムを対象としたものであるのに対し、廃棄物処理等からのクロム排出量は全クロムを対象としたものである点に留意を要する。ダイオキシン類排出量は 1998 年度の排出量であり、これは前年度に比べて 50%以上削減されている。焼却施設でのダイオキシン対策の一環として、排ガス中のばいじんに対する規制も強化されており、一部の重金属類の排出削減にも寄与していると考えられるが、焼却炉からの重金属類排出量は 1996 年度を対象として推計したものであるため、実際よりも焼却施設からの重金属類の排出を過大に見積もる要因となる。

3.2. DtT 法による重み付け係数

(1) 目標値の設定に影響を与える要因

本研究で作成した重み付け係数を用いて日本全体の環境負荷を評価した結果を表7に示した。(式1)から明らかなように、DtT 法による重み付けは、目標負荷量をどのように設定するかによって決まる。本試算では、削減率が 1990 年比 6%と低い地球温暖化は、削減率 50%の埋立地の逼迫よりも低く評価されたが、温室効果ガス濃度を安定させるために 60%削減とした場合や、一人あたり排出量の公平性を考慮して 90%削減とした場合には、地球温暖化はより重要と評価される。政策目標値は、懸念される影響の程度に加え、様々な集団の利害を考慮した上で決定される妥協の結果であるため、DtT 法の目標値設定には科学的知見に基づいた目標を用いることが適切との指摘がある²⁾。この指摘は、目標値との乖離のみに基づいて影響領域間の重み付けを行う場合には妥当なものと考えられる。しかし、政策目標の決定過程を分析し、環境問題の重要性を構成する要因を抽出していくといった対処も可能と考えられる。たとえば、対策のコストとの間で妥協が図られたのであれば、「対策コストの高さ」を重み付け手法の中に取り入れていくことも可能であろう。

表7：日本全体を対象としたDtT法による評価結果

環境影響領域	比率
地球温暖化	20%
酸性化	20%
埋立地の逼迫	34%
有害物質	26%

(2) 同一影響領域に存在する削減目標の異なる物質の扱い

有害物質の目標年間負荷量の設定は、重金属類およびダイオキシン類に対しそれぞれの削減率を適用して削減後排出量を算出し、これらを毒性統合係数で加重合計した値を用いた。そのため、それぞれに対する削減の緊急度の違いは反映されていない。これは、「9割削減が必要なダイオキシン類であっても、特に目標の設定されていない重金属類であっても、特性化後の参照物質 1kg 等量であれば及ばず影響は同じになる。削減率の違いは、各物質の排出量全体を評価したときの重要性の違いに対応するものである。」と解釈すれば、妥当と言えるだろう。

一方、排出量と影響とが線形関係にあるとは限らず、削減率の違いと無関係に有害物質の影響をモデル化

(特性化) していることに問題があると見ることもできる。つまり、「削減率が低い物質は摂取量が閾値に比べてあまり大きくなく、排出量が1単位増加しても影響の増加はそれほど認められないが、削減率が大きい物質は摂取量が閾値を超過している可能性が高く、排出量1単位の増加がもたらす影響は前者よりも大きくなる」と解釈する。この場合、バックグラウンド濃度や閾値を考慮に入れた特性化手法を用いることが有効な対処方法と考えられる。

また、対策の困難度に着目した場合、「削減率が小さい化学物質（対策がほぼ完了し、安価な対策技術が既に開発されている）と比較して、削減率の大きな化学物質を目標値まで削減するためには総額としてのみならず影響1単位を削減するための限界コストも高くなる」と考えることができる。一方、「対策コストが高いために目標とする削減率が低い」という状況も考えられるため、削減率の大小を持って対策コストの反映を図ることは不適當である。つまり、目標とされる削減率と対策コストは相互に関係するが、対象とする影響領域および対象物質によってその関係は異なる。被害のみではなく対策のコストも考慮した重み付け手法を用いることが有効と考えられる。

4. 結論と今後の課題

本研究では、以下を明らかにした。

1) Mackay モデルを用いて有害物質を対象とした健康影響の特性化係数を作成した。2) 重金属類の年間排出量を推計し、経団連 PRTR によって把握されている他にも同程度の排出源があるとの結果を得た。3) DfT 法による重み付け係数を作成し、環境問題の重要性を構成する要因について検討した。結果として生じる被害の程度他に、対策の困難度も重み付けを行う上で考慮することが望ましいと考えられた。

今後の課題としては以下があげられる。

- ・有害物質の年間排出量の把握をより確かなものとする。特に、1) 非点源からの排出量推定の充実、2) 産業別に集計した排出量と他国の排出インベントリとの比較による検証、3) 事業所別排出量と環境モニタリングデータとの突き合わせによる地理的分布の検証。
- ・環境領域間の重み付け手法として、被害と対策の困難度を考慮した手法を開発する。

<参考文献>

- 1) 永田勝也ら：LCA における指標統合化への試み、廃棄物学会第6回研究発表会講演論文集（1995）
- 2) M. Goedkoop：The Eco-Indicator 95, Final Report (1995) <http://www.pre.nl>
- 3) 伊坪徳宏・山本良一：非鉄金属材料製造における環境影響の統合評価、日本金属学会誌、vol.63, no.2, pp.208-214 (1999)
- 4) 松野泰也ら：日本におけるインパクトアセスメント統合指標の開発-Distance to Target 法を用いた統合化指標およびその適用例について、日本エネルギー学会誌、vol.77, no.12, pp.1139-1147 (1998)
- 5) J.G. Vogtlander, A. Bijma: The 'Virtual Pollution Prevention Costs 99', Int. J. LCA, vol.5, no.2, pp.113-124 (2000)
- 6) M. Goedkoop, R. Spriensma：Eco-Indicator 99 methodology report (2000) <http://www.pre.nl>
- 7) N. Itsubo et al.: Current Status of Weighting Methodologies in Japan, Int. J. LCA, vol.5, no.1, pp.5-11 (2000)
- 8) (社) 経済団体連合会：第3回経団連 PRTR 調査報告(2000)、<http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/>
- 9) D. Mackay: Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach, Lewis Publishers, Michigan (1991)
- 10) オランダ CML, RIVM 共著、松崎早苗 訳：有害物質の LCA インパクト・アセスメントー環境中の動態、生態系と人間への曝露と影響のモデリング、および 100 物質についての計算例、(社) 産業環境管理協会 (1997)
- 11) US EPA: Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (1998)
- 12) 中央環境審議会：大気汚染に係るダイオキシン類環境基準専門委員会報告 (1999)
- 13) IRIS: <http://www.epa.gov/ngispgm3/iris/subst/index.html>, 2000.04.時点
- 14) 厚生省：平成10年国民栄養調査