

LIME2 係数リストの解説（要約版）

はじめに

産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターは、LCA プロジェクト(第一期 1998年～2003年¹、第二期 2003年～2006年²)インパクト評価研究会と連携して、LCIA (Life Cycle Impact Assessment) 手法開発に向けた検討を重ね、日本版被害算定型影響評価手法(LIME: Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)を開発した。

LIME2 は第一期 LCA プロジェクトの成果の一つである LIME1 の更新版であり、第二期 LCA プロジェクトにおいて開発された。

本解説文は、2010年発行予定の書籍「LIME2-意思決定を支援する環境影響評価手法-」からの抜粋である。詳細や引用文献として用いる際は原書を参照されたい。

社会的背景

LCA プロジェクト開始当時(1998年)の LCIA 研究は、地球温暖化や人間毒性など特定の影響領域に対する潜在的影響量を評価する特性化と、様々な環境影響を統合して単一指標を得る統合化のための手法開発に二分されていた。このような状況下、従来の統合化手法は、特性化による結果から直接影響領域間の重み付けを行うことで単一指標を得る、いわゆる問題比較型の手法が主流であった。しかし、問題比較型は10項目以上の影響領域について同時に、かつ、実際にどの程度の環境影響が発生しているかについて殆ど情報を提示することなく比較するため、透明性や信頼性が著しく欠落しているという問題点が指摘されていた。

人間健康や生物多様性などのエンドポイントレベルでの被害量まで評価することにより、重み付けの対象項目数を最小化し、これらの比較により統合化を行う被害算定型の評価手法の有用性が国際的に認められている。LCIA の最新の方法(Eco-indicator'99, EPS, ExternE)の多くは被害算定型を採用しているが、インベントリが同一であっても発生する被害量は環境条件(気象、人口密度など)によって異なるため、我が国で利用できる被害算定型の LCIA 手法の開発が求められた。

第一期 LCA プロジェクトにおいて開発された LIME1 は国内の環境条件や環境科学の最先端の手法を反映した日本発の手法として2005年に公表された(伊坪 2005)。その後、様々な形で国内企業を中心に活用されるようになった(第一章 LIME 概要参照)。産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターは日経 BP 社と共同で LCIA 特別研究会を設立し、協賛企業 20 社を対象に LIME を用いた LCA や環境パフォーマンス評価に関する

¹ 正式名：製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発；新エネルギー・産業技術総合開発機構、委託先 産業環境管理協会

² 正式名：製品等ライフサイクル二酸化炭素排出評価実証等技術開発／インパクト等環境影響評価手法の開発；新エネルギー・産業技術総合開発機構、委託先 産業技術総合研究所

技術指導を行った。長野県は中小企業を対象として環境経営の支援に LIME を活用している。LIME1 の利用は既に産学問わず広がっており、既に 200 を超える事例研究に本手法が利用されている。

このような事例研究の積み上げを通じて、評価手法が改善すべき点が挙げられた。これの中でも、特に社会的ニーズの高い研究課題を優先的に解決するための検討を進め、その成果をとりまとめたものを LIME2 としてここに公開した。

LIME2 の構成と手法開発の方針

LIME2 の概念図を図 1 に示す。本手法における環境影響の評価は以下のステップに分かれる。

- (1) 環境負荷物質の発生による大気、水などの環境媒体中の濃度変化を分析する(運命分析)。
- (2) 環境媒体中における環境負荷物質の濃度の変化によって、人間などのレセプタによる暴露量の変化について分析する(暴露分析)。
- (3) 暴露量の増加によるレセプタの潜在的影響量の変化を被害態様ごとに評価する(影響分析)
- (4) 共通するエンドポイント(例えば人間健康)ごとにそれぞれの被害量を集約する(被害分析)。
- (5) 最後にエンドポイント間の重要度を適用させることで環境影響の統合化指標を得る(統合化)。

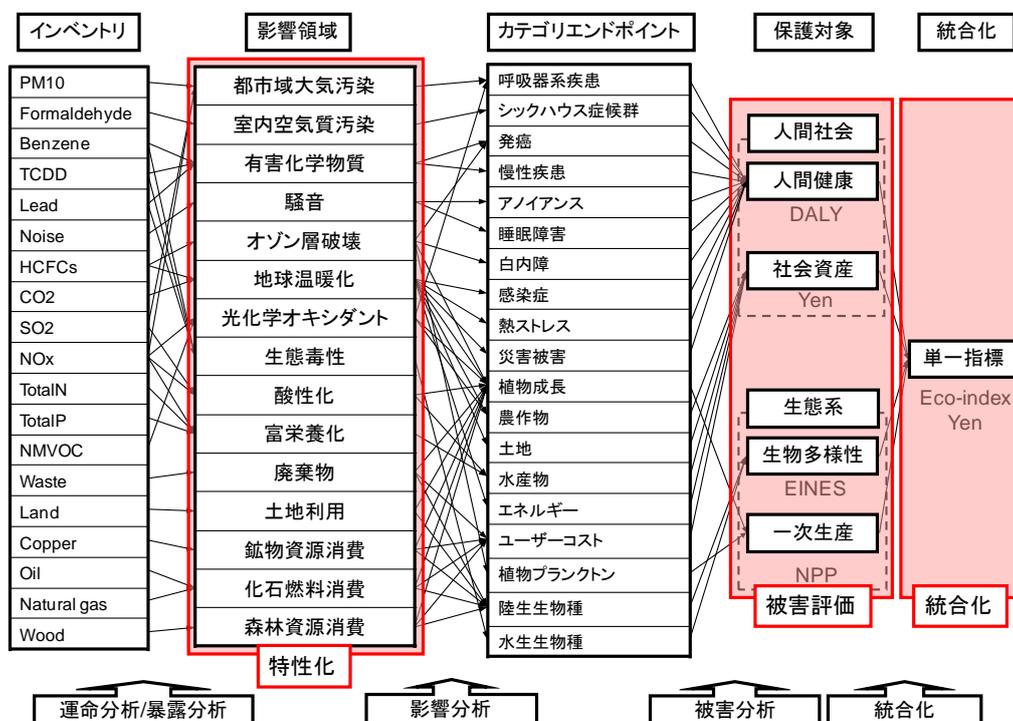


図 1: LIME の概念図と評価対象範囲

環境負荷によって発生する被害量を評価するためには、疫学、生態学、数理生物学、毒性学、気象学、緑地学などの自然科学的知見を、エンドポイントの間の重み付けを行って環境影響を統合化するためには経済学、社会学、心理学などの社会科学的分析を活用することで環境影響が評価される。

これまでの影響評価手法の開発は、LCA の研究者が中心になって行われていたが、上に挙げた各分野の最新の研究成果が十分に、かつ、網羅的に反映されているとは言い難い状況にあった。

そこで LIME の開発にあっては、専門分野の違いを考慮して、複数の委員会を設置して各領域において最も信頼性の高い理論を採用することで分野横断的で、かつ、体系的な評価手法を開発することができた。LCIA 研究者で構成される(1)インパクト評価研究会(親委員会)のもとに、大気環境学や土壌学、生態学など自然科学に関わる専門家で構成される(2)ダメージ関数小委員会、環境経済学者などで構成された(3)経済評価小委員会を設置し、計三つの研究会において手法開発のための検討を進めた。親委員会では LIME の枠組みと特性化係数の開発、ダメージ関数小委員会は被害評価手法の開発、経済評価小委員会では統合化係数の開発を担当した。このような組織体制のもと研究を推進することで、各分野における最先端の理論を効果的に LCIA 手法に導入することが可能となった。

主な成果物とその特徴

LIME の社会的普及という観点から見ると、LCIA の手法論を高度化するのは当然であるが、LCA の実施者が簡便に利用できることもこれと同等以上に配慮されなくてはならない。従来より LCIA 手法の活用方法は、インベントリデータとこれに該当する LCIA 用の評価係数との積和により評価を行うものであった。LCIA 計算用の独自のソフトウェアを開発し、シミュレーションにより LCIA を実施することができれば、LCA の信頼性を高めることができるかもしれない。しかし、ここでは LCIA 実施上の利便性を損なわないことを重視して、環境影響を評価するためのモデル開発とこれを用いたシミュレーションは開発者側が予め実施し、その算定結果に基づいて環境負荷物質それぞれに対する LCIA 評価係数リストを提供することを最終目的とした。これにより、実施者は LCIA 係数リストから引用した評価係数とインベントリの線形計算により、LCIA を実施することができる。図 2 に手法開発者と手法利用者の実施内容の関係についてまとめた。

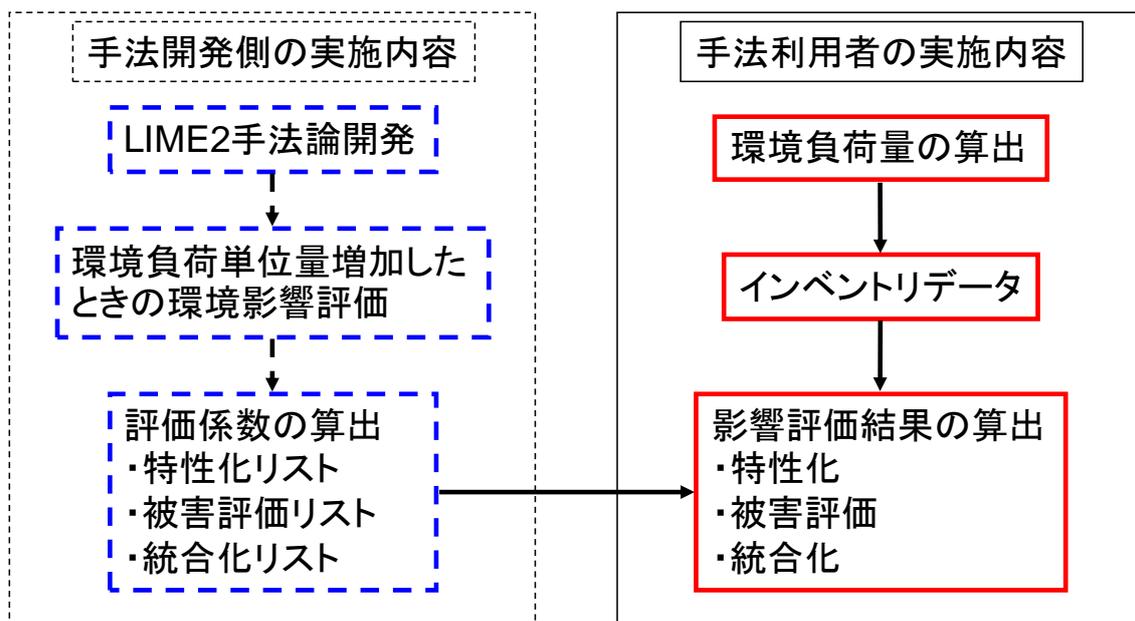


図2 手法開発者および手法利用者の実施内容

ここで示した手法開発者側の最終成果は以下に示す三種類の係数リストとして表現される。

- (ア) 特性化係数リスト
- (イ) 被害係数リスト
- (ウ) 統合化係数リスト

これら三種のリストを開発したのは、多様な LCA 実施者の目的に対応することに配慮したものである。実施者は、上記の三種のリストから自分の目的に合致したものを選択し、影響評価に適用することができる。表1に各リストの特徴についてまとめたものを示す。

表 1: LIME2 が開示する三種のリストの特徴

	特性化係数リスト	被害係数リスト	統合化係数リスト
基礎となる学術領域	環境科学全般(自然科学)	疫学、保険統計学、緑地学、数理生物学、毒性学など(自然科学)	環境経済学、推測統計学、計量心理学(社会科学)
評価の対象	影響領域ごと	エンドポイントごと	環境全体
結果の項目数	15 項目	4 項目	単一指標
評価結果の意味、次元	基準物質の等価量(ex. 温暖化の場合 CO2 eq. kg, ある物質 1kg による温室効果は CO2 何 kg に相当するかを指す)	被害量(ex. 人間健康の場合: 損失余命, ある物質 1kg の負荷は損失余命何年分に相当するか。)	外部費用(ex. ある物質 1kg の負荷は社会的費用いくりに相当するか)
ISO14042 との関係	必須要素	任意要素(被害評価というステップは現在 ISO において定義されていない。)	任意要素
信頼性	相対的に高い。自然科学的知見に基づく。	特性化と統合化の中庸。概ね自然科学的知見に基づく。	社会の選好に基づく。
対象物質の網羅性	約 1000	約 1000	約 1000
主な用途	LCA	LCA	LCA、企業評価、環境効率、フルコスト評価、費用対効果分析
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・信頼性が高い ・ISO-LCA の必須要素 	<ul style="list-style-type: none"> ・自然科学的知見の下で 4 項目に評価結果を集約できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・単一指標が得られる ・トレードオフが発生しない ・応用範囲が広い
問題点	評価結果の項目数が多い	国際的な議論がまだ未成熟。不確実性が相対的に高いといわれる	価値判断が不可避免的に導入される

このように特徴が異なる影響評価用係数を開発するため、本研究では以下のようなアプローチを採用した。

(ア) 特性化および特性化係数リスト

特性化は影響領域ごとに潜在的な環境影響を評価する段階である。複数の環境負荷物質が特定の環境問題に与える寄与を比較したり、統合したりすることができる。主観的な判断が入り込む要素が少ないため係数の信頼性は高く、ISO は特性化を LCIA の必須要素として位置づけている。特性化は被害量を求めることを目的としないことが多く、評価対象は排出などの環境負荷の発生から実際の環境影響が発生する前の中間時点が取り上げられ

ることが多い。どの時点が取り上げられるかは、影響領域により異なる。一例として、有害化学物質の特性化係数の算定の流れを図3に示した。

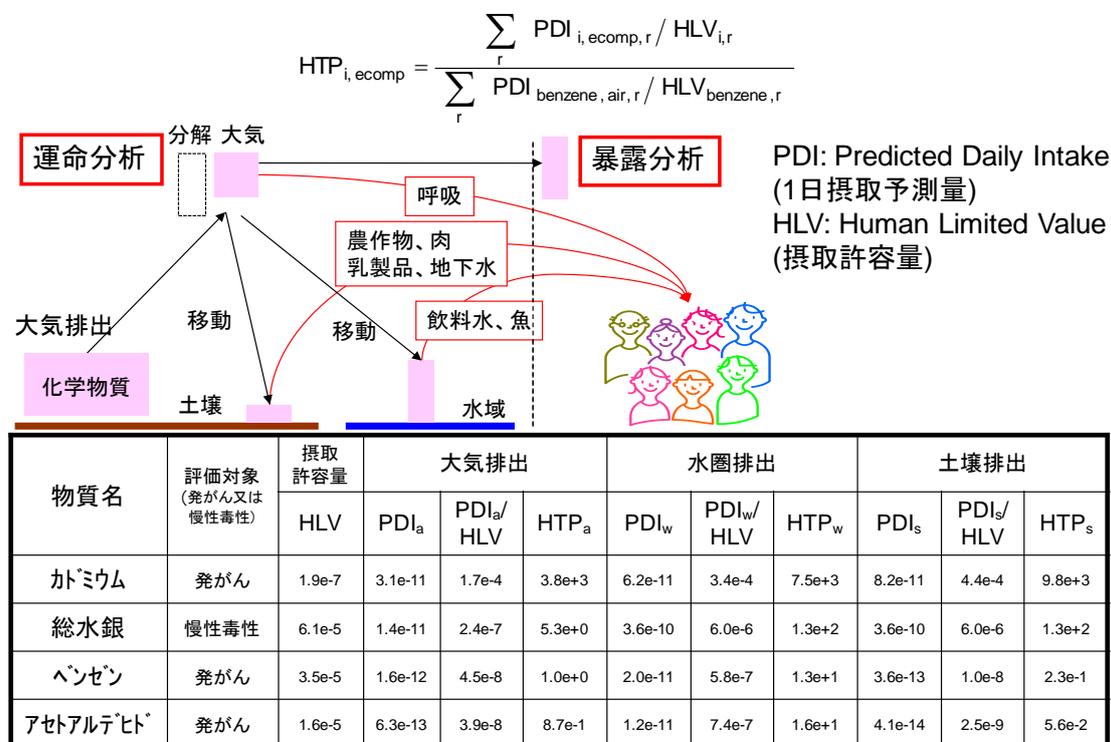


図3 有害化学物質の特性化係数算定までのフロー

一般に化学物質の有害性の評価では暴露効率と毒性の強さという二つの側面を考慮することが多い。ここでは暴露効率と閾値の比を利用する。つまり暴露量が大きく、閾値が小さいほど強い有害性を持つ物質であることを示すことができる。暴露効率の評価には、運命分析や暴露分析と呼ばれる手法が利用される。汚染物質が環境中に排出された後は、大気や水などの媒体内や媒体間を移動した後、人間や生態系が暴露する。排出から暴露までの効率が運命分析と暴露分析を通じて計算される。一方、閾値は既存の化学物質に関するデータベースを引用することで膨大な情報を活用することができる。このような計算やデータ収集を物質ごとに行った後、基準物質の比に対して評価対象物質の比が何倍であるか計算することで様々な物質の特性化係数を得ることができる。

特性化係数開発に向けた研究は、1990年代前半から行われており、LCIA研究の中でも最も進んだ分野であるとともに、利用実績も多い。そこで、特性化係数の開発にあっては、第一に既往の研究事例を整理した上で、これらの中から日本国内のLCA実施者に対して最も推奨することができる特性化係数の選定作業を行った。表2にここで推奨する特性化係数とその特徴についてまとめた。その多くは基準物質があり、他の物質による単位量の環境負荷が基準物質のそれより何倍寄与が大きいを示したものである。例えば、地球温暖化

では CO₂ が、オゾン層破壊では CFC-11 が基準物質として採用されている。

影響領域ごとに一つないし複数の特性化係数を推奨した。以下に特性化係数を推奨する際の主な考え方について示した。

地球温暖化やオゾン層破壊、資源消費のような地球規模の影響領域については、既に国際機関を通じて汎用性の高い特性化係数が提示されているので、係数間の差異を明確にした上でこれらの中から推奨する係数を選定した。

酸性化、富栄養化、都市域大気汚染、光化学オキシダント、有害化学物質、生態毒性、土地利用のような地域規模の影響領域については、国内の環境条件を反映した特性化係数が利用されなくてはならない。ここでは、日本の地理的条件に基づいて利用したシミュレーションを行った結果から独自の特性化係数を得るとともに、この結果を既往の研究事例と比較して推奨リストを選択した。

廃棄物については、国際的に見てこれを影響領域として設定した例は少なかったが、国内の環境問題としては非常に関心が高い。そこで、LIME では廃棄物を影響領域の 1 つとして採用し、廃棄物量を埋立容積に変換する係数を特性化係数として新規に加えることとした。

LIME2 では室内空気質汚染と騒音を新規影響領域として新たに加えた。騒音は音源のエネルギー量を用いた特性化係数を採用した。一方、室内空気質汚染については、有害化学物質におけるハザード比のような議論は少ない一方で、VOC 間の有害性の差異を考慮せずに総量で捉えることが多く、疫学、臨床学においても TVOC が指標として用いられることが多い。そこで、ここでは TVOC 量をカテゴリインディケータ³として採用し、特性化係数はいずれも 1 とすることとした。

推奨リストとして選定された特性化係数は、他の研究事例と合わせて「**特性化係数リスト**」に掲載した。

³ カテゴリインディケータとは、特性化の評価結果を指す。例えば、地球温暖化の場合は、温室効果ガスの排出量と GWP との積和がカテゴリインディケータとなる。

表 2 LIME2 が推奨する特性化係数とその特徴

影響領域	推奨する特性化係数	評価結果の単位	特性化手法が評価する内容
オゾン層破壊	ODP	CFC-11eq. kg	オゾン層破壊能力
地球温暖化	GWP	CO ₂ eq. kg	赤外線放射強制力
酸性化	DAP	SO ₂ eq. kg	沈着を考慮したプロトン量
都市域大気汚染	UAF	SO ₂ eq. kg	日本各地域の気象条件を反映
光化学オキシダント	OECF	C ₂ H ₄ eq. kg	日本各地域の気象条件を反映
有害化学物質	HTP cancer	C ₆ H ₆ air eq. kg	発がん性物質のハザード比
	HTP chronic disease	C ₆ H ₆ air eq. kg	慢性疾患のハザード比
生態毒性	AETP	C ₆ H ₆ water eq. kg	水生生物への有害性
	TETP	C ₆ H ₆ soil eq. kg	陸生生物への有害性
富栄養化	EPMC	PO ₄ ³⁻ eq. kg	溶存酸素消費量
室内空気質汚染	TVOC	kg	物質間の重み付けは行わない
土地利用	LOF	1/m ² /yr	土地の占有面積と占有期間
	LTF	1/m ²	土地改変面積
資源消費（鉱物資源、化石燃料、生物資源）	消費エネルギー	MJ	発熱量
	1/R	1/kg	可採埋蔵量の逆数
廃棄物	WPF	m ³ /kg	処分場に占める容積
騒音	NPF	J/台.km	音源のエネルギー

(イ) 被害評価および被害係数リスト

被害評価は、保護対象ごとに発生し得る被害量を評価する段階である。現在 LCIA 研究の中で最も注目されている領域の 1 つであるが、一方で合意事項の少ない領域でもある。LIME の開発では、第一に環境倫理学での議論を参考にして、被害量を算定するエンドポイントを定義するための検討を行い、「人間健康」、「社会資産」、「生物多様性」、「一次生産」の四項目を保護対象として定義することとした。次いで、これらが環境の変化により受ける被害量を表す被害指標を定義した。人間健康は保険統計学などで国際的に利用されている DALY(Disability Adjusted Life Year; 障害調整生存年)を、社会資産は多岐に渡る構成要素(農作物、森林、水産物、資源)が受ける影響を包括的に計量できる経済指標(円)を、生物多様性は保全生態学における絶滅リスク評価の手法論を基に独自に定義した EINES(Expected Increase in Number of Extinct Species)を、一次生産は生態学や緑地学において生態系の豊かさを示す指標として広く利用されている NPP(Net Primary Production; 純一次生産量)を被害指標として定義した。

被害係数を算定するまでの流れを図 S.4 に示した。ここでは、例として有害化学物質の

評価の場合を示す。特性化係数の算定において得た運命暴露分析の結果を利用する。これにより一貫した評価手法体系が構築される。被害評価では、暴露量の増加に対する疾患のリスク増分について分析する。これに対象人口を乗じて疾患者の期待値を求めた後、これを損失余命(DALY)に変換する。他の影響領域における被害評価でも同様に環境影響を同一の次元で表現することにより、合理的に異なる影響領域を通じた環境影響を比較したり、統合したりすることができる。

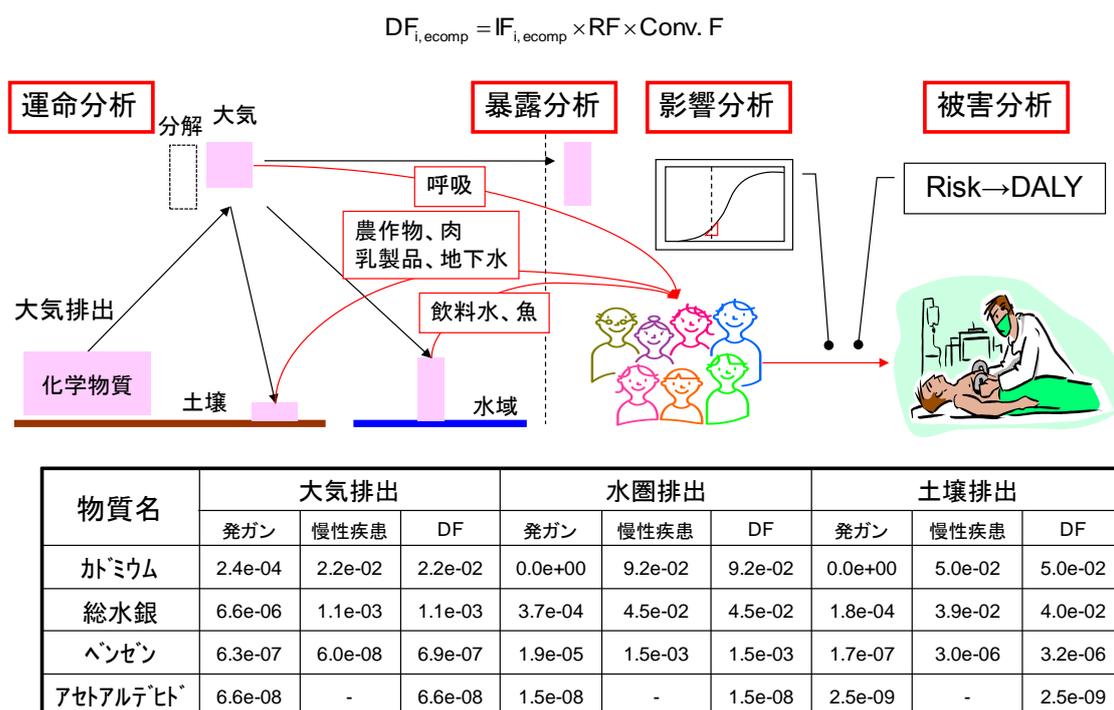


図4 有害化学物質における被害係数の算定フロー

よって、被害係数の開発では、環境負荷の発生と保護対象が受ける被害量の間を定量的に関係付ける必要がある。インベントリと被害量との関係付けは、被害に至るまでの各ステップを自然科学的知見から定量的に関連付け、これらを統合することにより、被害係数を構築した(図5参照)。

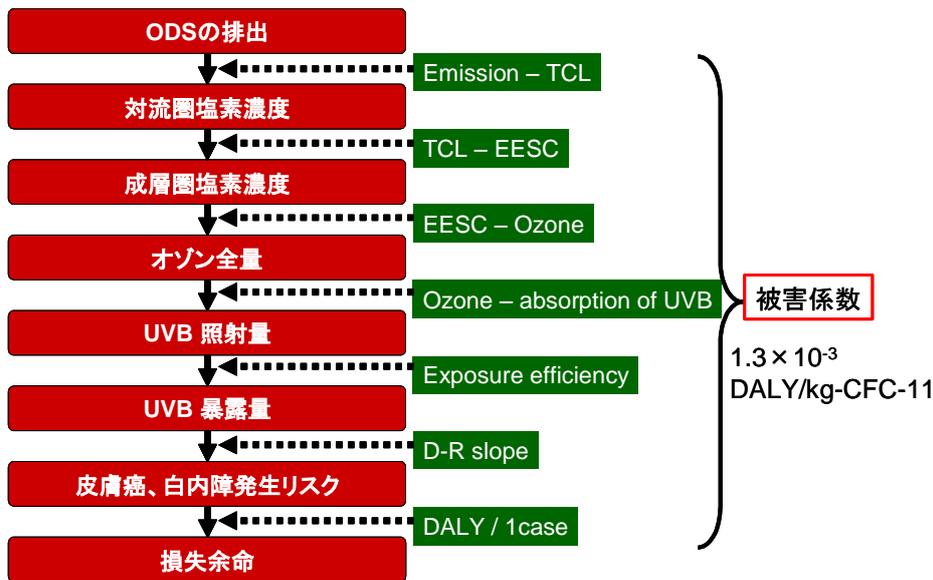


図 5: 被害係数の算定フロー (ODS (Ozone Depletion Substance) 発生から健康被害の定量的関係づけと被害量の集約まで); インベントリ (この場合 ODS) から損失余命までの経路を描き、各ステップの間を環境科学による研究成果等を基に定量的に関連づけ (ex. Dose-Response の関係)、これらを統合することにより被害係数が得られる。

このような検討を LIME で対象とした全ての環境負荷物質に対して検討した。表 3 に、LIME において被害量を計上した項目の種類(カテゴリエンドポイント)についてまとめた。図中の黄色部は LIME で計上したカテゴリエンドポイントを指す。例えば 地球温暖化を通じて発生する健康影響として マラリアやテング熱、災害等を取り上げていることを意味している。図中の青色部は、影響が小さいまたは考慮する必要性が低いと考えられる領域を指す。一方、赤色部は影響が大きい可能性があるが、現在の各分野の最新の知見から見ても算定が困難なため、今回は評価を見送った領域に相当する。これらの領域を対象とした評価手法の開発が今後の課題であるといえよう。このように、現時点では全ての環境影響について網羅して評価することは不可能であるが、現状の自然科学から被害量を定量化することができる領域と定量化が困難な領域を区分することで評価範囲の透明性を確保することに努めた。

被害係数の開発は、特性化係数の開発に比べて多くのモデルやパラメータを活用するため、不確実性が増大することが懸念されている。LIME2 では、特に重要な影響領域を対象として、被害係数の不確実性分析を行うとともに、その不確実性を改善するための検討を行った。本研究の結果から得られた被害係数については外部レビューを受け、改善作業を重ねることで極力信頼性の向上に向けた検討を行った。

得られた被害係数リストは「被害係数リスト」に掲載した。

表3 LIMEにおいて被害量を計上したカテゴリエンドポイントの一覧；黄色部は被害量を評価している領域，青色部は被害量が十分小さいと推測される領域，赤色部は重要であると推測されるが現時点で被害量を評価することが困難である領域を指す。項目名の前に※印が付加されているものはLIME2において新規に追加されたもの、太字で書かれている項目はLIME2において改変されたもの、斜体で書かれている項目はLIME1を引用したものを指す。

横：保護対象および被害指標 縦：影響領域	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産
	DALY	Yen	EINES	NPP
オゾン層破壊	皮膚癌 白内障	農業生産 木材生産		陸域生態系 水域生態系
地球温暖化	熱ストレス/寒冷ストレス マラリア, デング熱 災害被害、栄養失調・飢餓	農業生産 エネルギー消費 土地消失		
酸性化	(都市域大気汚染において評価)	木材生産 漁業生産		陸域生態系
都市域大気汚染	呼吸器疾患(12 態様)			
光化学オキシダント	呼吸器疾患(6 態様)	農業生産 木材生産		陸域生態系
有害化学物質	発癌(8 部位)、慢性疾患		(生態毒性において評価)	
生態毒性	(有害化学物質において評価)		陸域生態系 水域生態系	
富栄養化		漁業生産		
室内空気質汚染	※シックハウス症候群			
土地利用			陸域生態系	陸域生態系
資源消費(鉱物資源、化石燃料、生物資源)		ユーザーコスト	陸域生態系	陸域生態系
廃棄物	(有害な廃棄物は有害化学物質、生態毒性において評価)	※ユーザーコスト	陸域生態系	陸域生態系
騒音	※睡眠障害、※会話障害			

(ウ) 統合化および統合化係数リスト

被害評価の結果、保護対象4項目の評価結果が得られる。これらの項目の重み付けを通じて単一指標を得るための手続きを統合化と呼ぶ。環境影響(被害量)の統合化は、LCIAにおける利用が中心であったが、近年は環境会計や環境効率、環境パフォーマンス評価への活用がよく見られる。

図6に有害化学物質の場合を例に、統合化係数算定までの流れを示した。環境負荷の発生からレセプタが受ける被害までの関係は被害評価の結果が利用される。ある物質の環境負荷が複数のエンドポイントに対して影響を及ぼす場合は、保護対象間の重み付けを通じて単一指標化することができる。

$$IF_{i, \text{ecomp}} = \sum_e (DF_{i, \text{ecomp}} \times WF_e)$$

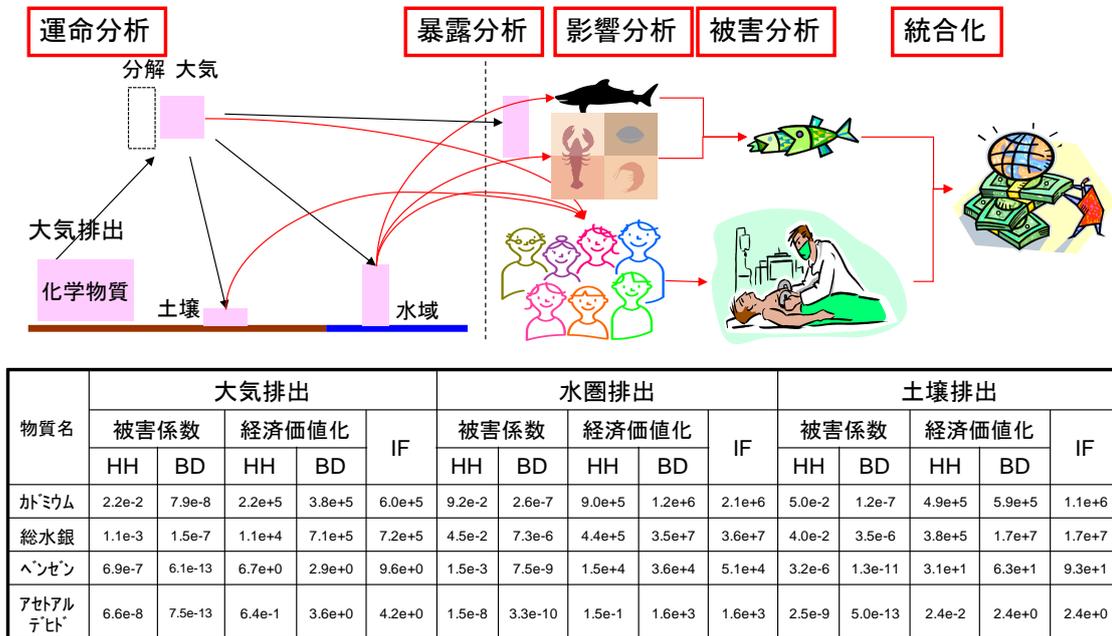


図6 有害化学物質における統合化係数の算定フロー

LIME1 および LIME2 では保護対象間の重み付けにコンジョイント分析を採用した。コンジョイント分析によれば、評価対象(例えば自動車)を構成する属性(例えば排気量、最高速度)の重みを住民等のアンケート調査結果を基に算定することができる。環境経済学では、環境を構成する要素(例えば干潟の生物多様性やレクリエーション効果)の効用を測る方法として、同手法は最先端の手法として特に注目を集めているが、LCIA において実際に利用された例はこれまでになかった。ここでは日本国民を対象として環境政策に関するアンケート調査を行い、その回答結果を統計解析することで保護対象の重み付け係数を得るとともに、その結果を被害係数に乗じることで統合化係数を算定した。

汎用的に活用できる重み付け係数を得るためには、解析結果が統計的に有意であることを確認しなくてはならない。このためには、回答者が調査票の内容を十分理解することが前提となる。調査内容が比較的難解であることから、回答者が誤解することなく回答することができる調査票を提示することが重要である。ここではプレテストを複数回実施し、回答者が十分内容を認識することができることを確認した上で本調査を実施した。本調査では、日本国民の環境思想を代表する重み付け係数を得ることを重視して、全国規模で回答者を無作為抽出するとともに、1000 件の訪問面接調査を行った。これにより、家族構成や性別、年齢や年収に偏りが出ないサンプルの抽出ができた。調査方法は電話調査やインターネット調査などがあるが、その中でも面接調査は、調査票の理解を促すと同時に、調査バイアスが含まれる恐れが最も少ない方法として位置づけられる。

得られた結果は、統計的有意性、分析に利用したロジットモデルの説明力のいずれも良好であり、社会的合意性が高く、かつ、汎用的利用に耐える統合化係数を開発することができた。また、LIME2 ではランダムパラメータロジットモデルを利用することで、重み付け係数の変動性について定量化することに成功した。これにより、主観的価値の差異を考慮した統合化係数を算定することができた。表 4 に LIME1 と LIME2 における統合化係数算定手順の差異について比較したものを示した。

統合化係数リストは「[統合化係数リスト](#)」に掲載した。

表 4 統合化手法における LIME1 と LIME2 の主な相違点のまとめ

	LIME1	LIME2
回収したサンプル数	400	1000 (回収率 48%)
調査方法	会場面接調査	訪問面接調査
調査地域	関東	全国
重み付け係数	代表値	代表値と統計量
統計的有意性	検証済み	検証済み

引用元文献

伊坪徳宏(2010)：LIME2-意思決定を支援する環境影響評価手法-、社団法人産業環境管理協会