



コンジョイント分析の応用による L C I A の統合化 係数の開発

伊坪, 徳宏 ; 坂上, 雅治 ; 栗山, 浩一 ; 鷺田, 豊明 ; 國部, 克彦 ; 稲葉,
敦

(Citation)

環境科学会誌, 16(5):357-368

(Issue Date)

2003

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 環境科学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90004722>



総合論文

コンジョイント分析の応用による
LCIAの統合化係数の開発伊坪 徳宏*・坂上 雅治**・栗山 浩一***・
鷲田 豊明****・國部 克彦*****・稲葉 敦*

摘 要

LCIA (ライフサイクル影響評価) を構成する多様な環境影響を統合化して単一指標化する重み付け手法は、製品選択等の意思決定に有用な情報を提供するものとして、これまでに多くの手法開発に向けた検討がなされてきた。その中でも、経済評価指標は評価結果のわかりやすさとLCC (ライフサイクルコスト) や環境会計などの他の評価ツールにも応用できる観点から注目されている。コンジョイント分析は、マーケットリサーチにおいて広く利用されてきたが、近年環境経済学における研究に適用されつつある。本手法によれば統合化指標を経済評価と無次元の単一指標の二種類の評価結果を得ることができ、未だ国際的に合意のとれていない統合化手法研究の水準向上に大きく貢献することが期待されるが、現時点でLCIAにおいて適用された事例はなかった。

LCA 国家プロジェクト (経済省/NEDO) では、信頼性と透明性の向上を図るため、日本版の被害算定型影響評価手法の開発に向けた検討を進めている。本手法を構成する被害評価によれば、人間の健康、生物多様性、社会資産、一次生産の四項目の保護対象の被害量に関する情報が得られる。以上の背景から本研究では、LCA プロジェクトにおいて対象とする四項目の保護対象間の重要度比較についてコンジョイント分析を適用することで実施し重み付け係数の算定を行うと同時に、これまで提案された統合化手法による結果との比較を通じて当該手法の有用性について検証した。評価結果の統計的優位性が立証されただけでなく、他の評価手法による結果とも整合する結果を得られたことから、本手法のLCIAへの利用可能性を見出すことができた。

キーワード：LCA, LCIA, 保護対象, コンジョイント分析, 重み付け

1. 背景と目的

LCA (ライフサイクルアセスメント) が環境マネジメント構築に向けて有用なツールとして認識されて以来、これまでに多数のインパクト評価手法が提案されてきた (例えば BUWAL¹⁾, Schmidt-Bleek²⁾, Itsubo et al.³⁾)。企業など製品設計側から見ると、対象とする製品が環境に及ぼす影響を示す情報は、多岐に渡る製品機能の一側面であるため、環境情報

はより簡易で明瞭であることが望ましい。この観点から、LCAの構成要素であるライフサイクル影響評価 (LCIA) の中でも統合化手法に対する注目が高まっている。

LCIAにおける統合化手法によれば、地球温暖化、オゾン層破壊、大気汚染、資源枯渇など多様な環境影響が単一の指標で表される。環境変化により実際に影響を受ける人間や生態系などのエンドポイントの種類や汚染物質の排出からエンドポイントまでの

2002年12月2日受付, 2003年4月22日受理

* (独)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

** 日本福祉大学情報社会科学部

*** 早稲田大学政治経済学部

**** 豊橋創造大学経営情報学研究科

***** 神戸大学大学院経営学研究科

影響のメカニズムは、環境問題によって大きく異なる。そのため、環境影響を統合化した評価結果としての指標は、(1) 手法開発者が独自に設定した無次元の指標 (例えば Goedkoop⁴⁾, Itsubo et al.³⁾) か、(2) 環境影響を経済換算したうえで金額表示するもの (例えば EC⁵⁾, Steen⁶⁾) かに分けられる。前者は手法開発者の環境影響に対する考え方を単一指標の定義に反映させる柔軟性を有するため、統合化手法が開発される比較的初期の段階から提案はされてきた。しかし、前者に属する手法は手法間によって指標の意味が異なっているため、評価結果の値を直接比較することができない。これに対して、後者の手法は評価結果の信頼性については問題があるものの、評価結果は金額であるため、結果の差異について議論しやすい。さらに、得られた結果は社会が負担しなくてはならない、いわゆる外部コストであるため、得られた結果をライフサイクルコストと比較したり、環境会計に応用したりなど、利用可能性に優れるといった長所を有する。国際的にはいずれの指標で表した方が良いという合意はないのが現状である。

環境影響を経済的に評価する手法は、(1) 環境負荷の発生からエンドポイントが受ける被害量を算出した上で、(2) 予め設定しておいたエンドポイント一単位あたりの経済価値額を (1) の結果にかけることで環境影響を被害額として算定する。ここで、(2) で利用されるエンドポイントの価値額は、CVM (仮想評価法) により得た結果を引用する形で利用されている。

本研究では、経済評価の手法として、近年、環境経済学の中で、最新の手法として位置づけられるとともに、最も注目されているコンジョイント分析を用いる。当該手法によれば、設定された属性の部分効用を評価し、属性の一つが費用などの経済情報で表されることを条件として、属性の価値を経済指標で示すことができる。影響評価手法において対象とするエンドポイントを属性として取り扱うことで、コンジョイント分析に基づく統合化指標の開発の可能性が期待されるが、現段階において LCIA の中ではこのような検討は行われていない。また、CVM は評価対象の全体効用を経済的に評価するのに対して、コンジョイント分析は評価対象を構成する複数の部分効用間の重み付けを行った上で経済評価を行う。LCIA の一般的手順のガイドラインについて記述した ISO 14042⁷⁾ では、LCIA の最終段階を 'Weighting (重み付け)' として規定する。複数項目間の重要性を考慮した上で単一指標化することを明示する ISO の枠組みから見れば、エンドポイントご

とに独立して環境価値額を評価し、結果的に単一指標を得ることができる CVM のアプローチよりも、エンドポイント間の重み付けを行った結果を単一指標化に反映させるコンジョイント分析の方が Weighting の考え方に近いとも言える。さらに、コンジョイント分析によれば、複数の属性間 (本研究では人間の健康、社会資産、一次生産力、生物多様性) の重み付けの結果が得られるため、上記の無次元の指標と経済指標の双方の統合化指標を同時に算定することができるという長所を有する。

このような背景から、本研究では経済評価手法としてのコンジョイント分析を LCIA に適用することでエンドポイントの被害量一単位の経済評価を行い、この結果を統合化指標の開発に反映させるための情報を得ることを目的とした。

2. 日本版被害算定型影響評価手法と本研究の対象範囲

経済産業省では産業界が信頼性の高い LCA を簡便に実施することを可能にするための、データベース開発を目的とした国家プロジェクト (以下 LCA プロジェクトと呼ぶ) を 1998 年より五カ年計画で進めている⁸⁾。当該プロジェクトの中では、日本版の影響評価手法の開発に向けた検討が行われている⁹⁾。ここでは、日本で環境負荷が発生したときに誘起される環境影響量を、可能な限り高精度に、かつ、透明性を高く評価するための手法開発が行われている。当該プロジェクトの最終結果として、特性化、被害評価、統合化の三種のリストを開示することとしている。特性化は地球温暖化やオゾン層破壊など影響領域ごとに指標を示すもので、自然科学的知見に基づいた評価を実施できるため結果の信頼性は高いが、評価結果の項目数は多くなるので製品選択などの意思決定に直結しない可能性がある。一方統合化によれば単一指標が得られるとう長所があるが、人間と生態系の比較のように、エンドポイント間の価値判断が不可避免的に導入される。被害評価によれば、人間健康や生物多様性のようにエンドポイントに指標を集約できるので、特性化よりも評価項目数が限定されるが、モデルやパラメータをより多く導入しなくてはならないため、信頼性は特性化よりも劣る。また、統合化のようにエンドポイント間の価値判断は回避できるので、統合化よりも信頼性は高いが単一指標は得られない。実施者にとってどのステップが望ましいかは、実施者の LCA の目的による。なるべく多様な LCA 実施の目的に広範に合致するために、これら三種のリストを公表するものである。図 1 に LCA プロジェクトにおいて採用

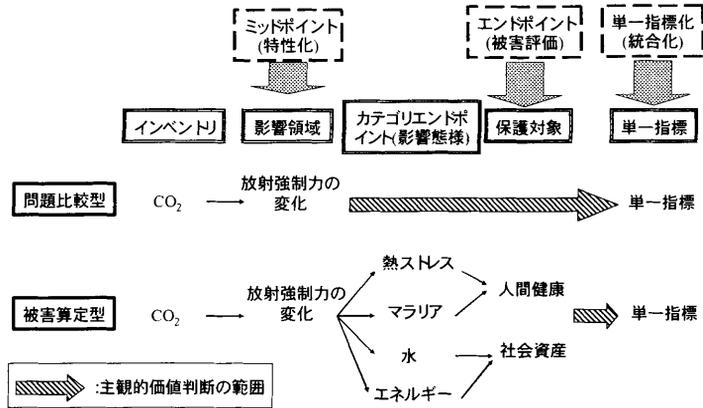


図1 統合化まで含めた LCIA 手法の概念図；問題比較型と被害算定型に分かれる。LCA プロジェクトインパクト評価研究会では透明性と信頼性の向上のため、被害算定型に属する影響評価手法の構築を行っている。本研究では、被害算定型の中で、エンドポイントと単一指標を定量的に関係づけるための分析評価を行った。

する LCIA 手法の枠組みと本研究の目的の範囲について示した。本研究により得られた知見は被害量の評価結果から単一指標化を行うために必要な情報を提供するものとして利用される。

3. 本研究で採用したアプローチ

3.1 コンジョイント分析の概要

以下における議論は、主として鷺田¹⁰⁾、栗山¹¹⁾に基づいている。

コンジョイント分析は 1960 年代に心理学者ルースらによって構築され、その後マーケティング分野で発展を遂げた消費者選好の測定手法である。新製品の開発や新市場の開拓などの際に、事前にアンケート調査を行うことで、収益性およびマーケットシェアを予測しリスクの軽減をはかるために用いられている。マーケティング分野でのコンジョイント分析の活用に関する包括的な研究としては、Louviere and Woodworth¹²⁾、Green and Srinivasan¹³⁾、Cattin and Wittink¹⁴⁾、Goldberg, Green and Wind¹⁵⁾がある。

鷺田¹⁰⁾によれば、コンジョイント分析とは、様々な属性別に人々の選好を評価する手法の総称である。コンジョイント分析では、属性を束ねたプロフィールと呼ばれるカードが一般に用いられる。多属性によって構成される商品等がプロフィールによって特定される。例えば、自動車は排気量、搭載人数、最高速度、価格、スタイルなど様々な属性が存在する。1500 cc の排気量、5 人乗り、最高速度 200 km、150 万円、セダンというように、対象とする属性および水準をそれぞれ特定することで各プロフィールが生成される。これらプロフィールを回答

者に示して、プロフィールに対する選好を回答者に尋ねることで属性別の価値（効用）が得られるのである。コンジョイント分析と CVM の最大の相違点は、前者は属性別の価値（部分効用）まで測ることができるのに対して、後者は対象物や事象の総体に対して評価（全体効用）を行うことである。したがって部分効用の測定に重点を置きたい本研究のような調査案件に対してはコンジョイント分析を適用するのが妥当であると言える。

コンジョイント分析の質問形式は主に、完全プロフィール評定型、ペアワイズ評定型、選択型に分かれる。栗山¹⁶⁾によれば、完全プロフィール評定型やペアワイズ評定型では、購入確率の設定やプロフィールの並び替えおよび一部の属性だけを含んだ部分プロフィールを提示するといった質問形式は現実の消費行動になじみが薄く非現実的であるとされる¹⁷⁾。選択型コンジョイントは、複数の商品の中から一番好ましいものを選ぶという日常的な消費行動に極めて近く、現実性が高い質問形式であるといえる。また、心理学の観点から人間は 6 を越える情報を同時に処理することは困難であることが知られており¹⁸⁾、これに従えば、選択型コンジョイントで扱える属性は最大で 6 個となる。本研究において対象とする属性は、保護対象 4 項目 + 税金の全 5 項目であり、選択型コンジョイントを利用する上での許容範囲内であるといえる。

以上の議論を受けて、本研究では、選択型コンジョイント分析に基づいて保護対象ごとの効用について評価することとした。なお本研究における調査の流れを図 2 に概観した。

本研究における最終目標は、それぞれの保護対象

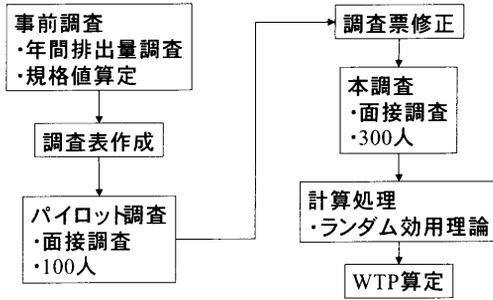


図2 本調査の実施フロー

(エンドポイント)の被害1単位を回避することに対する支払意思額(WTP)を得ることにある。これはランダムサンプリングによるコンジョイント調査票(アンケート)の回答結果を統計的に処理することによって得られる1人当たりの限界的なWTPからアプローチするものである。

3.2 推計モデル

コンジョイント分析では、ランダム効用理論に基づき条件付きロジットモデルを用いて推定を行う。ここでの議論はMcFadden¹⁹⁾、Ben-Akiva and Lerman²⁰⁾に基づいている。

ランダム効用理論では効用は確率的に変動すると仮定され、

$$U_i = V_i(x_i, t_i) + e_i$$

のように確定的な項 V とランダムな項 e を含めた効用関数を想定する。 x_i はプロフィール i の属性ベクトルであり、 t_i は貨幣属性である。このとき回答者がプロフィール i を選択する、すなわち $U_i > U_j$ となる確率 P_i は、

$$P_i = \text{Prob}(V_i + e_i > V_j + e_j) \\ = \text{Prob}(e_i - e_j > V_j - V_i)$$

となる。誤差項の確率分布型として第1種極値分布を仮定すると、確率は

$$P_i = \frac{\exp(V_i)}{\sum \exp(V_j)}$$

と表される。このモデルが条件付きロジットモデルである。スケールパラメータは1に標準化している。なおパラメータの推計は最尤法による。

つづいて厚生測定である(限界的な)支払意思額(marginal willingness to pay: MWTP)を導出する。まず以下の効用関数を考える。 β は推計されるパラメータである。

$$V = \sum \beta_i x_i + \beta_t t$$

これを全微分すると、

$$dV = \sum \frac{\partial V}{\partial x_i} dx_i + \frac{\partial V}{\partial t} dt$$

となる。いま効用水準が変化せず($dV=0$)、当該

属性以外の属性が不変であるとする、

$$MWTP = \frac{dt}{dx_i} = -\frac{\beta_i}{\beta_t}$$

が得られる。

4. コンジョイント分析における調査票の作成

4.1 保護対象と被害指標の定義

コンジョイント分析で利用される調査票を作成するに当たって、プロフィールデザインを行わなくてはならない。そのための前提条件として、プロフィールを構成する属性の定義とその属性に関する定量的情報が必要となる。本研究では、保護対象間の重み付けを行うので、これらがプロフィールを構成する属性として定義される。LCAプロジェクトインパクト評価研究会では、環境倫理の観点から保護対象の定義に向けた検討を行っており⁸⁾、その結果、人間の健康、社会資産、一次生産、生物多様性の四項目を保護対象として定義した²¹⁾。前二者は人間生活を営む上での構成要素として、後二者は生態系を保全するための構成要素として分類されたものである。コンジョイント分析による統合化を行うにあたって、属性数があまり多くなりすぎると価格のような重要な属性が過小評価され、その結果、他の属性の支払意思額が過大評価になってしまう恐れがある。したがって、統合化を実施する際には、保護対象は項目数をなるべく少なくすることを配慮しなくてはならない。また、コンジョイント分析を実施する上で、保護対象ごとに定量的な被害情報が提示されなくてはならない。このためには、被害を適切に表す指標が必要となる。上記の四項目より更に少数に限定すると、これらを代表する指標を選定するのは極めて困難になる。上記のような、統合化実施上の要件を考慮した上で、四項目が定義されている。

次いで、保護対象の被害量を示す指標について定義した。環境負荷の発生から保護対象が受ける被害量までを関連づけるダメージ関数の開発は、LCAプロジェクトインパクト評価研究会において議論されており、人間の健康影響を表す指標としては、DALY (Disability Adjusted Life Year: 障害調整生存年数)、社会資産は損失コストを、一次生産はNPP (Net Primary Productivity: 純一次生産力)、生物多様性は生物の絶滅種数を利用することとしている⁸⁾。以下、DALYおよびNPPについて簡単に説明を加えておく。

DALYは世界銀行やWHOの協力を得てMurrayが世界全体での死亡や疾病による健康損失の総量を定量化(Global Burden of Disease: GBD)するために開発された指標である²²⁾。DALYは早死による損失

年数 (Years of Life Lost: YLL) と障害生活期間 (Years Lived with Disability: YLD) の和で求められる。GBD 研究の成果は WHO が発行する Health Report において毎年掲載されているとともに、各国の医療政策に反映されるなど大きな貢献を果たしている。LCIA では既に Hofstetter²⁹⁾、Goedkoop³⁾ において利用されている。DALY は時間の次元を有しており、通常は年で表される。

NPP は総一次生産力から植物の呼吸によって消費される量を差し引いた分に相当する。NPP は植物の生理生態的特徴、気候条件、及び土壌条件によって変化する。それらの総合として地球上の各気候帯に特徴的な生態系タイプの純一次生産力は、砂漠・ツンドラでのゼロに近い値から熱帯多雨林の約 30 ton 乾物/ha/年まで変化する。NPP は 1970 年代から研究が進められており、これまでの実績も豊富である。Lieth ら²⁰⁾ は植生や水域区分ごとに NPP を求めると共に、世界全体の NPP とその分布状況を地図化した。日本では清野ら²⁶⁾ が日本の NPP を地図化すると共に、日本全体の純生産量の評価を行った。

4.2 シナリオの設定

本研究で実施するコンジョイント分析においては、保護対象に関する情報が仮想的に組み合わされた形でプロフィールデザインがなされる。この際に、回答者が自己の価値判断に基づき意思決定ができるように、プロフィールが示す意味を回答者にわかりやすい形で説明する必要がある。ここでは、国の環境政策に関する選択肢としてプロフィールを提示することとした。

4.3 規格値の算定

コンジョイント分析における調査票を作成する上で、各属性の定量的情報を示すことは重要な手続きとなる。本研究で採用した選択型コンジョイントでは、現状の環境の状態を示すプロフィールを提示できるとともに、それに対して特定の属性を変化させたプロフィールを選択肢として設定する。そこで、まず現状のプロフィールについて算定する必要がある。

この現状を表すプロフィールについて、本研究では日本における年間の環境負荷に伴って発生する保護対象の被害量の算定結果を用いた。本研究では、ある一定期間における特定地域の影響量を規格値と呼ぶことにする。規格値は LCIA の正規化に利用される。正規化は LCIA における付加的要素に該当する 1 ステップである。主に影響領域ごとに得られる特性化の結果に対して規格値で割ることで、一定の共通する基準下で全ての影響領域について無次元化を行うものであり⁷⁾、重み付けを行うための前処理

的な位置づけで利用されることが多い。LCA プロジェクトでは保護対象間の重み付けを行うため、本研究における規格値の算定は保護対象ごとに行った。規格値の算定は環境負荷物質ごとに得た年間の環境負荷量と単位量あたりの環境負荷に対する保護対象の被害係数の積の和により算定される。

$$\begin{aligned} & \text{Normalization Value}_e \\ & = \sum_s (\text{Annual Environmental Loading}_s \times \text{Damage Factors}_{s,e}) \end{aligned} \quad (1)$$

Normalization Value: 保護対象 e が一年あたりに受ける被害量 (規格値)

Annual Environmental Loading_s: 日本における環境負荷物質 s の一年間の環境負荷量 (kg)

Damage Factor_{s,e}: 保護対象 e に対する環境負荷物質 s の被害係数 (被害量/kg)

被害係数としては、これまでインパクト評価研究会における研究を通じて算定されたダメージ関数を利用した。ダメージ関数は環境負荷物質の排出によって特定の影響態様を経て保護対象が受ける被害量を算定したものである。例えば、二酸化炭素 1 単位の排出によるマラリア発生に伴う損失余命が相当する。ダメージ関数は影響態様ごとに算定されているので、ダメージ関数の総和が被害係数に相当する。

$$\text{Damage Factors}_{s,e} = \sum_t \text{Damage Function}_{s,e,t} \quad (2)$$

Damage Function_{s,e,t}: 環境負荷物質 s 1 単位の負荷により影響態様 t を通じて保護対象 e が受ける被害量 (被害量/kg)

年間排出量に関するデータは、地球温暖化などの影響領域ごとに分類した上でそれぞれの環境負荷物質ごとに得た。文献において国内の年間排出量が掲載されている場合は、それらを引用することとしたが、掲載されていない物質、特に、化学物質等については PRTR のパイロット調査結果²⁶⁾ から国内総排出量を推算した。表 1 に規格値算定のための対象物質と該当する影響領域、保護対象をまとめた。

本研究においては、現時点で資源消費に関するダメージ関数が未開発であったことから、今回の評価対象範囲からは除外した。

ダメージ関数は、影響態様ごとに分類して設定されている。表 2 では、評価に含めた影響態様について、影響領域と保護対象と関連づけて表 2 に示した。

1998 年よりダメージ関数構築に向けた検討は継続して行われてきたが、現時点において評価対象範囲全てを網羅してはいない。表 2 においてハッチがかかっている部分は LCA プロジェクトにおいてダ

表1 規格値の算定に含まれる物質とこれに関わる影響領域と保護対象

保護対象	影響領域	対象物質
人間の健康	地球温暖化	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs, SF ₆
	オゾン層破壊	特定フロン, ハロン, その他のCFC, 四塩化炭素, 111-TCE, HCFCs, HBFCs, 臭化メチル
	光化学オキシダント	NMVOCs, NOx, CO
	都市域大気汚染	CO, SO ₂ , NOx
	有害化学物質(重金属含む)	ヒ素, ベンゼン, カドミウム, 6価クロム, ニッケル, 2,3,7,8-TCDD, 1,1,2-トリクロロエタン, 塩化メチル, トリクロロエチレン, ジクロロメタン, 1,2-ジクロロエタン, 1,1-ジクロロエタン, シアン化合物, 鉛, 銅, 1,1,1-TCE
生物多様性	生態毒性	ヒ素, ベンゼン, カドミウム, 6価クロム, ニッケル, 2,3,7,8-TCDD, 1,1,2-トリクロロエタン, 塩化メチル, トリクロロエチレン, ジクロロメタン, 1,2-ジクロロエタン, 1,1-ジクロロエタン, シアン化合物, 鉛, 銅, 1,1,1-TCE, テトラクロロエチレン, 1,3-ジクロロプロペン, チウラム, シマジン, チオベンカルブ, セレン, フッ素, ほう素
	土地改変	土地改変面積(土地利用形態ごと)
	資源消費	含めていない
	廃棄物	廃棄物量
	一次生産	地球温暖化
一次生産	オゾン層破壊	特定フロン, ハロン, その他のCFC, 四塩化炭素, 111-TCE, HCFCs, HBFCs, 臭化メチル
	酸性化	Nox, SO ₂ , NH ₃ , HCl
	土地改変	土地改変面積(土地利用形態ごと)
	資源消費	含めていない
	廃棄物	廃棄物量
社会資産	地球温暖化	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs, SF ₆
	オゾン層破壊	特定フロン, ハロン, その他のCFC, 四塩化炭素, 111-TCE, HCFCs, HBFCs, 臭化メチル
	富栄養化	COD, 全窒素, 全磷
	光化学オキシダント	NMVOCs, NOx, CO

表2 本研究に含めたカテゴリエンドポイントリスト

影響領域	保護対象	カテゴリエンドポイント
地球温暖化	人間の健康	熱ストレス, 寒冷ストレス, マラリア, デング熱
	社会資産	農作物(イネ, トウモロコシ, コムギ, ダイズ, ジャガイモ, キャッサバ), エネルギー
	一次生産	陸上植生
オゾン層破壊	人間の健康	皮膚癌(悪性黒色腫, 基底細胞癌, 有棘細胞癌), 白内障
	社会資産	農作物(イネ, ダイズ, エンドウマメ, マスタード)
	一次生産	針葉樹林, 植物プランクトン
酸性化	社会資産	水産物(アメマス, サケ, カラフトマス, サクラマス, ベニザケ)
	一次生産	陸上植生
富栄養化	社会資産	水産物(ヒラメ・カレイ類, タイ類, ボラ類, スズキ類, アナゴ類, アイナメ, キス, コノシロ, イサキ, ハゼ, エソ類, ハモ, サワラ類, イカナゴ, フグ類, ニギス類, サヨリ, エビ類, カニ類, 貝類, イカ類, タコ類, ナマコ類, シヤコ, その他の水産動物類, 海藻類)
	人間の健康	急性死亡, 呼吸器系疾患による入院, 喘息発作, 軽微な行動制限, 急性呼吸器系疾患
光化学オキシダント	人間の健康	森林
	社会資産	森林
	一次生産	イネ, ダイズ, コムギ
人間毒性(都市域大気汚染, 有害化学物質)	人間の健康	発癌(部位ごと), 呼吸器系疾患
生態毒性	生物多様性	本研究において設定した仮想的被害量を適用
	土地利用	生物多様性
資源消費	一次生産	陸上植生
	生物多様性	本研究において設定した仮想的被害量を適用
	一次生産	本研究において設定した仮想的被害量を適用
廃棄物	生物多様性	本研究において設定した仮想的被害量を適用
	一次生産	陸上植生

注: 廃棄物は環境負荷物質であり、影響領域として定義するのは一般でない。しかし、本研究では、廃棄物問題を本手法において評価し含めることを明示するために、当該問題を影響領域の一つとして定義することとした。ここでは、廃棄物の増大に伴う処分場新規建設等に伴う土地改変と関係づけ、これに土地改変に伴う一次生産への被害との定量的関係づけを統合することにより、廃棄物の発生による保護対象の被害量を評価した。

メージ関数の開発が終了していない部分に相当し、本研究に反映することができなかった。ただし、生物多様性に関する被害量については、レッドデータブック²⁶⁾に記載された植物の減少要因に関する情報から仮想的な年間被害量を推定した結果で代用した。

これらの情報を下に保護対象ごとに規格値の算定を行った。その結果を表3に示した。

算定に利用した年間の環境負荷量、ダメージ関数の詳細は Appendix 1 に示した。この結果をそれぞれの属性を説明する上での基礎資料として利用した。CVM における環境経済評価では、アンケート対象者の理解促進のため写真やイラストを掲載することが多いが、本研究において対象とする保護対象は自然景観のように写真で示すことができない。回答者の理解を促進するため、属性の説明にはグラフを添付するなどして短時間で現況を把握できるようにした。さらに、調査方法は面接方式を採用し、調査員が回答者に対して実際に説明文を読んで全体の説明を行った。

4.4 属性・水準値の設定

規格値の結果を基準として、質問票に提示される各属性の水準の設定を行った。繰り返しになるが、得られた規格値が各属性における水準値の現状を示

すプロファイルに相当する。ここでは、規格値を基準として、当該影響量を半分に低減した場合、1/4に低減した場合、被害量の発生をゼロにした場合の4水準を保護対象ごとに設定した。さらに、それぞれの保護対象が受ける被害量一単位に対するWTPを算定するというを明確にするという意味で、環境保全のための支出に関する項目を貨幣属性として加えた。支出の態様は、税金と基金の二つが考えられるが、保護対象の被害情報が年あたりの情報であることとの対応から、一年きりの税金の上昇という形で組み込んだ。具体的な属性・水準については表4に一部示されている通りである。ただし最右の選択肢は現状を示すプロファイルであり、この属性・水準値にこれまでに見た規格値の算定結果が反映されている。なお、人間の健康属性と生物多様性属性については以下その属性・水準の設定に関する留意点を記す。

人間の健康属性について、健康影響に関わる環境負荷物質の一年間の放出により、年間 1.4×10^6 年の健康被害量を誘起するという算定結果を得た。福田²⁸⁾は1993年における日本の疾病負担(国内で発生した全ての健康影響量に相当)を 1.3×10^7 年として算定しており、今回の計算結果を国内で発生する健康影響のみに限定したとき、環境影響としての健

表3 本研究において算定された規格値(保護対象の年間被害量期待値)

	人間健康	社会資産	生物多様性	一次生産
単位	DALY	百万円	種	乾物 tom
地球温暖化	5.77×10^5	4.53×10^4		2.10×10^7
オゾン層破壊	6.91×10^3	5.25×10^1		7.00×10^2
酸性化				3.00×10^2
都市域大気汚染	6.05×10^3			
有害化学物質	7.47×10^3			
光化学オキシダント	1.66×10^3	8.67×10^1		
富栄養化		8.96×10^2		
土地改変			0.18	1.42×10^6
廃棄物				1.19×10^2
その他(森林伐採、菌雲採取、自然遷移など)			0.32	
規格値	1.43×10^6	5.44×10^4	0.5	1.54×10^6

表4 調査票サンプル

課題	政策1	政策2	政策3
人間の健康	損失余命1日 (50年で2ヶ月弱)	損失余命なし (0日)	現状を維持 (50年で200日)
社会資産	半分 (250億円に相当)	現状を維持 (500億円に相当)	現状を維持 (500億円に相当)
一次生産	4分の1 (37.5億トン)	半分 (75億トン)	現状の生産力を維持 (150億トン)
生物多様性	0.1種が新たに絶滅 (50年で5種)	新たな絶滅なし	0.5種が新たに絶滅 (現状のベース)
税金の追加額 (1世帯あたり、1年)	年間1万円追加	年間5,000円追加	追加支出なし

注:人間の健康の被害量はDALY(死亡に至らない障害等も含む)であるが、回答者にとってはDALYのコンセプトを理解することが困難であると考え、より平易な用語として「損失余命」として提示することとした。

康損失は全体の約6.7%を構成した。規格値をそのままレベルの設定に利用するのは、回答者にとって理解するのは極めて困難であるものと判断して、よりわかりやすい情報を提供するため、人口で割ることで一人あたりの損失年数(約4日)を得て、これを現状の影響量を表す基準値とした。さらに、一年あたりの損失日数のみでも被害の程度を理解しにくいことがあり得ると考え、この状況を50年間継続した場合6ヶ月程度の損失にあたることという旨の情報を回答者の理解を補助するために合わせて提供することとした。

生物多様性について、本項に該当するダメージ関数は、現在検討中であるため規格値の算定は行っていない。そこで、レッドデータブックによる情報を下に仮想的な規格値の選定のための検討を行った。レッドデータブックによれば維管束植物の絶滅若しくは絶滅が危惧される種数について示されている。これによれば、既に絶滅したものと野生絶滅したものの和は25種とされている。当該絶滅種数は50年前付近から開始された結果であるものと推定した上で、年間0.5種を仮想的な年間被害量として設定した。また、絶滅に起因する環境問題(影響領域)を併記することができないため、レッドデータにおいて示されている植物種の消失要因を示すことで代用した。ただし、消失要因は23項目に細分されており、そのまま調査票に提示するには情報が多岐に渡りすぎるため、細項目を5項目にカテゴライズしたものを示すこととした。プロフィールは年間の被害量で統一している。本項目における年間被害量は小数点以下となってしまう、この値のみでは回答者の理解が困難になる恐れがあった。そこで、人間の健康の場合と同じように、50年間この状況が継続したときの被害量も合わせて提示することとした¹⁾。

各属性・水準による4⁵⁾の組み合わせから、直交計画を用いてプロフィールデザインを行った。実際の質問票では3つの選択肢から(先述の通り、最右は現状プロフィール)最も望ましいと考えるプロフィールを選択することとなる。表4に質問票の例を示す。表4のような質問形式が回答者一人あたり8回

行うものとした。

5. 本調査および結果

上記のプロファイルを含めた質問票を利用して、表5の要領にて面接本調査を行った²⁾。

上記要領の下、本論文3で示したランダム効用理論に基づく分析により回答結果を統計処理した結果を表6に示した。

すべての係数について1%水準で有意であり、符号条件も整合的であった³⁾。なお現状バイアス⁴⁾の存在は有意に検証されなかった。さらにこの結果から以下の式により、保護対象1単位の被害に対する支払い意思額を算定した。ただし、世帯数は46607千世帯として計算した。ここで被害基準値表示について、人間の健康は1日、社会資産は1億円、一次生産は1億トン、生物多様性は1種、税金は円である。

$$\text{Weighting Factor}_{i,e} = \frac{\text{係数}_e}{\text{係数}_{tax}} \times \frac{\text{基準}_{tax} \times \text{世帯数}}{\text{基準}_e}$$

ここで得られた重み付け係数(支払い意思額)を利用すれば、LCIAでは以下のようにして統合化を行うことができ、統合化の結果は金額で表される。LCI(ライフサイクルインベントリ)の結果は対象製品等のライフサイクルを通じて発生する環境負荷なので、以下の式により算定された統合化の結果は社会が支払うコストに相当する。

$$I_1 = \sum_e \sum_s \text{Inv}_{s,e} \times \text{Damage Factor}_{s,e} \times \text{Weighting Factor}_{i,e}$$

表5 調査概要

調査対象: 20 - 59歳の男女					
調査方法: モールインタビューセプトによる会場調査					
調査地域: 東京(4ヶ所)					
調査期間: 2002年1月22 ~ 25日					
有効回答数: 306人(内訳は下記)					
調査対象の分類:					
	20代	30代	40代	50代	合計
男性	43	43	31	37	154
女性	42	43	31	36	152
合計	85	86	62	73	306

- 1 これら規格値に関する情報(例えば時間軸等)については先述の通り調査員が一对一で丁寧に説明を行ったため、回答者に十分理解され得たと考える。
- 2 なお、これより前に、調査対象・調査方法・調査地域を同じくして108人の回答者を対象にプレテストを行った。本調査票の作成にはその結果を反映させている。
- 3 ちなみに、回答者のサブグループによる回答の傾向をみると、男女別では特に差はなかったが、若年層と高齢層において、若年層グループでは「人間の健康」属性についてあまり重視しない傾向がやや見受けられた。
- 4 一般に、当アンケート調査の趣旨に対する抵抗感や税金という支払手段への抵抗感等を示すために現状プロフィールを選択するような場合に生じるバイアスのこととされる。

I: 経済評価に基づく統合化結果 (円)

Inv._s: 物質 s のライフサイクルインベントリ (kg)

Weighting Factor_{1,e}: 保護対象 e 1 単位の被害の回避に対する支払い意思額 (円/被害単位置)

同じ基準の下で保護対象間での重み付けを行う観点から、表7の結果を利用して年間の被害量に対する被害総額を求め、この結果から新たな重み付け係数を得た。これは、表7で得た支払い意思額に規格値(表3)をかけることで算定することができる。この結果を表8に示した。

表8より得た重み付け係数は保護対象の年間被害量に対する重み付け係数であるため、被害評価の結果を規格値で割ったものに重み付け係数をかけることでLCIAの統合化を行うことができる。

$$I_2 = \sum_e \sum_s \frac{Inv_{s,e} \times \text{Damage Factor}_{s,e} \times \text{Weighting Factor}_{2,e}}{\text{Normalization Value}_e}$$

I₂: Weighting factor₂を利用した場合に得られる統合化結果 (dimensionless)

Weighting Factor₂: 保護対象の年間被害量の対比により得られた統合化係数 (dimensionless)

このように2つの重み付け係数が得られることはコンジョイント分析ならではの結果である。年間の被害相当額は保護対象間で異なるもののオーダーは同じであった。この結果から得た四項目の相対的な重要度比較では人間の健康影響が最重視されており、次いで生物多様性が重視され、一次生産と社会資産に対してはほぼ同程度重み付けが割り当てられるという結果となった。LCAプロジェクトにおいて定義された四項目の保護対象間の重み付けを行った研究はこれまでにない画期的なものである。本研究と同じく被害算定型のLCIA手法に属するEco-

indicator'99では人間の健康、生態系の質、資源の三項目間の相対比較をパネル法により行った。ここでは、Cultural Theoryを採用し、階層主義、平等主義、個人主義の三タイプに類型化した上で、それぞれの重み付け係数について評価した。これによれば、人間健康、生態系、資源の重み付け係数として、階層主義では4:4:2、平等主義では3:5:2、個人主義は5.5:2.5:2としている。Eco-indicator'99での生態系の質の評価は、生物種の消失種の割合を指標化したものであるため、本研究で対象とした保護対象の中では、生物多様性が最も近いものと考えられる。本研究の保護対象の一つである社会資産は、鉱物資源、化石燃料、生物資源、水産資源、農作物が含まれる。Eco-indicator'99で採用されている保護対象の一つである「資源」は、鉱物資源と化石燃料のみを対象としているので、本研究における保護対象「社会資産」の部分集合として位置づけられる。健康影響については双方とも対象範囲は同等である。このような対象範囲の違いを考慮しつつ、双方の結果について比較してみる。本研究によれば、健康影響は最大、生物多様性の倍以上の重み付けがなされた。これはEco-indicator'99の個人主義の結果に近いことになる。この要因としては、属性としての保護対象の項目数が影響しているものと考えられる。本研究で設定された四項目の保護対象は、人間生活と生態系健全性の二項目に分類した上で、さらにこれらの質・量の視点から二分することで得られたものである²⁰⁾。本研究の結果をこの上位概念のレベルで重み付けを取ると、構成要素の和からおよそ人間生活:生態系健全=0.6:0.4となる。Eco-indicator'99において保護対象として定義されている資源は、化石燃料と鉱物資源である。

表6 本調査による評価結果

属性	係数	標準誤差	t値	P値
人間健康	-0.139686	0.01944	-7.18566	0.0000
社会資産	-0.0008564	0.000162	-5.29724	0.0000
一次資産	-0.0034133	0.000494	-6.91625	0.0000
生物多様性	-1.47314	0.146312	-10.0685	0.0000
税	-8.91 E - 05	4.80 E - 06	-18.5608	0.0000

回答者数306人、ρ²=0.12、対数尤度-2380.51

表7 本調査結果から算定した(限界的な)支払い意思額

属性名	基準	支払い意思額 (円/被害基準値)
人間健康	1DALY (年)	5.72 × 10 ⁶
社会資産	1,000円	4.46 × 10 ⁶
一次生産	1 ton	1.78 × 10 ⁶
生物多様性	1種	7.68 × 10 ⁶

表8 日本における年間環境負荷排出総量に対する被害相当額

属性名	被害相当額(円)	重み付け係数
人間健康	8.18 × 10 ⁶	0.48
社会資産	2.43 × 10 ⁶	0.14
一次生産	2.74 × 10 ⁶	0.16
生物多様性	3.84 × 10 ⁶	0.22

これらは人間社会に利用されることに価値が見出されるものであるため、人間生活との関連が強いものと解釈できる。この上位概念での比較をEco-indicator'99にも適用すると、人間生活、生態系の順で階層主義では、6:4、平等主義では5:5、個人主義は7.5:2.5となる。これによれば、本研究の結果はEco-indicator'99の階層主義の結果と近いことがわかる。Eco-indicator'99ではアンケートの結果の平均値を階層主義の重み付け係数として利用するとともに、特に実施者が環境思想を選択しない場合は階層主義の重み付け係数の利用を推奨している。本研究の結果は様々な環境思想を代表する結果として与えられるため、Eco-indicator'99の結果と比較的整合するものと考えられる。

また、人間生活の構成要素の間、すなわち、人間健康と資源あるいは社会資産で比較すると、本研究では社会資産は健康影響の1/3程度とされたのに対して、Eco-indicator'99では資源に対する重み付けは健康影響の1/2~1/3であり、健康と資源または社会資産との関係は両者において近い結果となった。以上の結果から、人間と生態系との間の比較、人間の構成要素間での比較において、本研究とEco-indicator'99の間では整合するものであったと言える。

6. 結 論

LCA プロジェクトインパクト評価研究会において開発検討中である被害算定型影響評価手法では、特性化、被害評価、統合化の三つのプロセスにおける影響評価の実施に対応することを目的としている。最終プロセスである統合化では、被害評価の結果として提示される保護対象の被害量に対して、保護対象の重み付け係数を適用することで単一指標化を行う。本研究は説得性の高い保護対象の重み付けを実施するための検討を行うものである。この実施可能性の高い手法として、本研究ではコンジョイント分析に注目した。コンジョイント分析によれば、以下の二種類の重み付け係数を算定することができる。

- (1) 保護対象1単位の被害を回避するための支払意思額
- (2) 保護対象の年間被害量に対する相対的重み付け係数

前者によれば、社会的費用の算定が可能となる。後者によればISO 14042⁷⁾の規定、すなわち、特性化、正規化、重み付けという順に沿ってLCIAを行うことができるという特徴を有する。このような二つの種類の重み付け係数を、経済理論に基づき、かつ、一度の分析で得ることができることにコンジョ

イント分析をLCIAに応用する意義がある。

コンジョイント分析が適用される属性の数は少ない方が望ましい。従来のLCIAの統合化手法である問題比較型の場合、10項目以上ある環境問題を同時に比較しなくてはならないため、多属性評価には適さないと考えられる。数百に渡るインベントリ物質を対象としてコンジョイント分析を適用して有意な結果を得るのは、さらに困難な作業となる。本研究ではエンドポイントの被害量を保護対象ごとに算定し、属性の数を最小限にすることができる被害算定型を採用した。コンジョイント分析による環境の多属性評価は、環境経済学においては多くの検討がなされているが、体系的にLCIA手法に適用した研究は、本研究が世界的にみて初めての研究である。

また、これまでの環境経済評価における人間・生態系などの価値に関する評価研究では、本来重要性を考察する上で基礎的情報として与えられるべきエンドポイントの被害の状況に関する情報が定性的であるか、定量的であっても汚染物質の大気中濃度など実際の被害以前の段階での表現が利用されることが多かった。本研究において採用したダメージ関数に基づく被害評価の結果は、属性としてのエンドポイントが受ける被害量を特定の単位で定量的に表現されており、これらをプロフィールデザインに適用した研究は環境評価の分野においても殆ど実施されていなかった。

ダメージ関数の研究成果を反映しつつ保護対象間の比較検討を行った結果は、統計的にも有意であり、回答者の調査票の理解度は十分担保されていることがわかった。これまでのLCIAにおける重み付け係数開発研究においては統計的有意性さえ十分な検証が行われていなかった現状から見れば、本研究の結果をLCIAの統合化において利用する可能性を見出す結果を得たといえる。ただし、本研究で利用した調査票に利用された規格値は、一部仮想値を使用している。全てのダメージ関数を構築した後に得られた規格値を基にコンジョイント分析を再度実施することが望まれる。規格値の変化に対する重み付け係数や支払意思額がどの程度変化するかについて感度分析を行うことが、規格値と統合化係数との関係を明確にする上で重要な検討課題であると考えられる。

今回の結果によれば、人間の健康が最重要視され、次いで生物多様性が重視され、一次生産と社会資産がほぼ同等となった。本研究により得られた結果は回答者群が有する様々な環境に対する思想を基礎として得られた期待値である。Eco-indicator'99では、人々が持つ環境思想を三つに類型化した上で

重み付け係数をそれぞれ設定している。本研究の結果は統計的有意性が高かったので類型化の必要性は低いと考えたが、LCIA の実施者の環境思想をなるべく統合化に反映させ、かつ、統合化手法間の比較を行うという観点から見れば、類型分けして重み付け係数を算定することは有用である。環境思想の類型化を行う必要性についての検証が今後求められる。

文 献

- 1) BUWAL (1997) BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297: Bewertung in Oekobilanzen mit der Methode der oekologischen Knappheit — Oekofaktoren, 1997.
- 2) Schmidt-Bleek, F. (1997) ファクター10, エコ効率革命を実現する, シュプリンガー・フェアラーク東京.
- 3) Itsubo, N., A. Inaba, Y. Matsuno, I. Yasui, and R. Yamamoto (2000a) Current Status of Weighting Methodologies in Japan, Int. J. LCA 5(1) 5-11 (2000).
- 4) Goedkoop (1999) M. Goedkoop and R. Spriensma: The Eco-indicator 99, A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report (1999).
- 5) EC (1998) European Commission: ExternE: Externalities of Energy, Vol. 7, Methodology 1998 update.
- 6) Steen (1999) Steen, B.: A Systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS). Version 2000- Models and Data of the Default Method, Chalmers University of Technology.
- 7) International Organization for Standardization (2000) ISO14042, Environmental management —Life cycle assessment— Life cycle impact assessment.
- 8) 産環協 (2001) (社)業環境管理協会, 平成12年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構委託, 製品等ライフサイクル環境影響評価技術開発成果報告書, 平成13年3月.
- 9) Inaba (2000) A. Inaba, T. Mizuno, N. Itsubo: Development of Japanese LCIA Method Considering the Endpoint Damage, Proc. 4th Int. EcoBalance (2000).
- 10) 鷺田 (1999) 鷺田豊明, 環境評価入門, 勁草書房.
- 11) 栗山 (2000) 栗山浩一, 環境評価と環境会計.
- 12) Louviere J.J., G.Woodworth (1983) “Design and Analysis of Simulated Consumer Choice or Allocation Experiments: An Approach Based on Aggregate Data, Journal of Marketing Research, 20, 350-367.
- 13) Green P.E. and V.Srinivasan (1990) “Conjoint Analysis in Marketing:New Developments with Implications for Research and Practice”, Journal of Marketing Research, 54, 3-19.
- 14) Cattin P. and D.R. Wittink (1982) “Commercial Use of Conjoint Analysis:A Survey”, Journal of Marketing, 46, 44-53.
- 15) Goldberg S.M., P.E. Green and Y. Wind (1982) “Conjoint Analysis of Price Premiums for Hotel Amenities”, Journal of Business, 57, 1, S111-S132.
- 16) 栗山 (1999) 栗山浩一, 鷺田豊明, 栗山浩一, 竹内憲司 (編), 環境評価ワークショップ, 第2章, 築地書館.
- 17) Green et al (1991) Green, P.E., Krieger, A.M. and Agarwal, M.K., Adaptive Conjoint Analysis, Some Caveats and Suggestions, Journal of Marketing Research, 28, 215-222.
- 18) Miller (1956) Miller, G.A., The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information, The Psychological Review.
- 19) McFadden,D. (1974) “Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior”, in P. Zarembka eds., “Frontiers in Econometrics, Academic Press, 105-142.
- 20) Ben-Akiva, M. and S.R.Lerman (1985) Discrete Choice Analysis, MIT Press.
- 21) Itsubo N. and A. Inaba (2000b) Definition of Safe-guard Subjects for Damage Oriented Methodology in Japan, Proc. 4th Int. EcoBalance (2000), 217-220.
- 22) Murray (1996) C.J.L. Murray and A.D. Lopez (Eds.); The Global Burden of Disease, Volume 1, WHO/ Harvard School of Public Health/ World Bank, Harvard University Press, Boston 1996.
- 23) Hofstetter (1998) P. Hofstetter: Perspectives in Life Cycle Impact Assessment, Kluwer Academic Publishers (1998).
- 24) Lieth H., Whittaker, R.H. (1975) Primary Productivity of the Biosphere, Springer-Verlag, (1975).
- 25) 清野 (1985) 清野 豁, 内嶋善兵衛, 自然植生の純一次生産力の農業気候学的評価 (2) 日本における純生産量の評価, 農業気象, 41(2) 139-144, 1985.
- 26) 環境省 (2002) 環境省環境保健部環境安全課, 平成13年度PRTRパイロット事業報告書, 平成14年7月.
- 27) 環境庁 (2000) 環境庁自然保護局野生生物課 編「改定・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック— 8植物 I (維管束植物)」, 財団法人 自然環境研究センター, 2000.
- 28) 福田 (1999) 福田吉治, 長谷川敏彦, 八谷 寛, 田端航也, 日本の疾病負担と障害調整生存年 (DALY) 厚生 の指標, 46, 4 (1999).

Development of Weighting Factor for LCIA based on Conjoint Analysis

Norihiro ITSUBO *, Masaji SAKAGAMI **, Koichi KURIYAMA ***,
Toyoaki WASHIDA ****, Katsuhiko KOKUBU ***** and Atsushi INABA *

(* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

** Department of Social and Information Sciences, Nihon Fukushi University
26-2 Higashimhaemi, Handa, Aichi 475-0012, Japan

*** School of Political Science and Economics, Waseda University,

**** Toyohashi Sozo University

***** Graduate School of Business administration, Kobe University)

Abstract

Weighting, final step of LCIA, is attractive to provide single index. Many of weighting methodologies have already been proposed until now. Among them, economic valuation has been taken attention because of the facility to understand and availability. Conjoint analysis, one of the methodologies seen as economic methodology, is attractive tool to compare between the significance of attributes. In environmental economics, conjoint analysis is considered as effective and the most up-to-date method internationally.

Endpoint type LCIA methodology based on Japanese environmental conditions is now being developed in LCA national project of Japan. One of the characteristics of this methodology is that we can calculate the potential damages of safeguard subjects considering the knowledge of environmental science. Damage assessment enables us to minimize the numbers of attributes. In order to provide weighting factors to practitioners whose goals of LCIA are to obtain single index, we applied conjoint analysis to weight across safeguard subjects. The purpose of this research is to measure WTP (Willingness To Pay) for each safeguard subjects and to establish weighting factors of them. The elements we chose are: human health, social welfare, primary productivity, biodiversity, and tax rate. The main research was conducted in Tokyo. The statistical result shows that all of the coefficients are statistically significant. This research belongs to LCA National Project of Japan.

Key Words: LCA, LCIA, Safeguard Subject, Conjoint Analysis, Weighting