

論文の内容の要旨

論文題目:

Methodological Framework, Knowledge Accumulation Strategy,
and Information System for Scenario-Based Lifecycle Assessment
(和訳 シナリオ評価型ライフサイクルアセスメントのため
のフレームワーク、知識集積、および情報システム)

氏名: 福島 康裕

本研究では「シナリオ評価型ライフサイクルアセスメント(LCA)」手法を開発した。この手法は、新規技術やリサイクルシステム、同機能製品の比較といった、ライフサイクルを考慮した様々な種類・目的のシナリオ開発・評価に用いることができる。単位サービスあたりの環境負荷の計算が目的である従来の製品LCAの拡張であり、より広い場面での意思決定支援が可能になる。すでに、シナリオ評価を実施したLCA ケーススタディーは数例報告されているが、まだ一般的枠組みは提案されておらず、十分にその実施環境が整っているとはいえない。本研究では新たにシナリオ評価型ライフサイクルアセスメント手法の枠組みを提案し、その実施を支援するソフトウェアと情報システムの設計と構築を行い、実施に必要な知識の集積方法を確立した。具体的成果としては PET ボトルのリサイクルプロセスの導入シナリオについてシナリオ評価型LCAの実施、シナリオ開発手法とライフサイクルアセスメント手法の統合による新たなフレームワークの提案、モデル記述言語 LCML の開発、LCML を用いたソフトウェアの開発、知識集積メカニズムの提案、分散型情報システム DOLCE のプロトタイプとこれを用いたシナリオ評価型LCA 支援システムの実装、が挙げられる。

フレームワークの提案

シナリオ評価型LCAでは、シナリオを図2に示すように3種類のモデルによって表現されるものと定義した。ライフサイクルモデル、および影響評価モデルは連立方程式モデルである。製品ライフサイクルに関する変数(フローの量、プロセスにおける変換係数、様々な制約条件など)の間の関係を定義するのがライフサイクルモデルであり、環境の変化や価値観の変化などの影響評価に関する変数間の関係を定義するのが影響評価モデルである。シナリオモデルは、ライフサイクルモデルと影響評価モデルに対応して構築され、それぞれの方程式モデルに含まれる変数群のシナリオ変数、固定変数、およびこれらに従属な変数への分類と、それぞれに設定する値を持つ。あるひとつのシナリオは、ライフサイクルモデル、影響評価モデル、およびライフサイクルモデル用と影響評価モデル用の2種類のシナリオモデルの組合せによって表現される。図3にシナリオ評価型ライフサイクルアセスメントのフレームワークを

示す。ライフサイクルインベントリ解析(LCI)、環境影響評価(LCIA)の二つの部分に分かれ、それぞれの部分でシナリオ開発がなされるような構成になっている。このフレームワークは、LCA のフレームワークと一般的なシナリオ開発のフレームワークをもとに統合したものとなっている。図 2 では、原料供給量変化を示すプロセスシナリオ、技術の進歩によるプロセスデータの変化を示す技術シナリオ、気候変動などの環境の変化を表現する環境シナリオ、そして資源の採掘可能年数などによって変動する評価カテゴリー間の重み付けの変化を表現する価値シナリオについてのシナリオモデルの例が示されている。

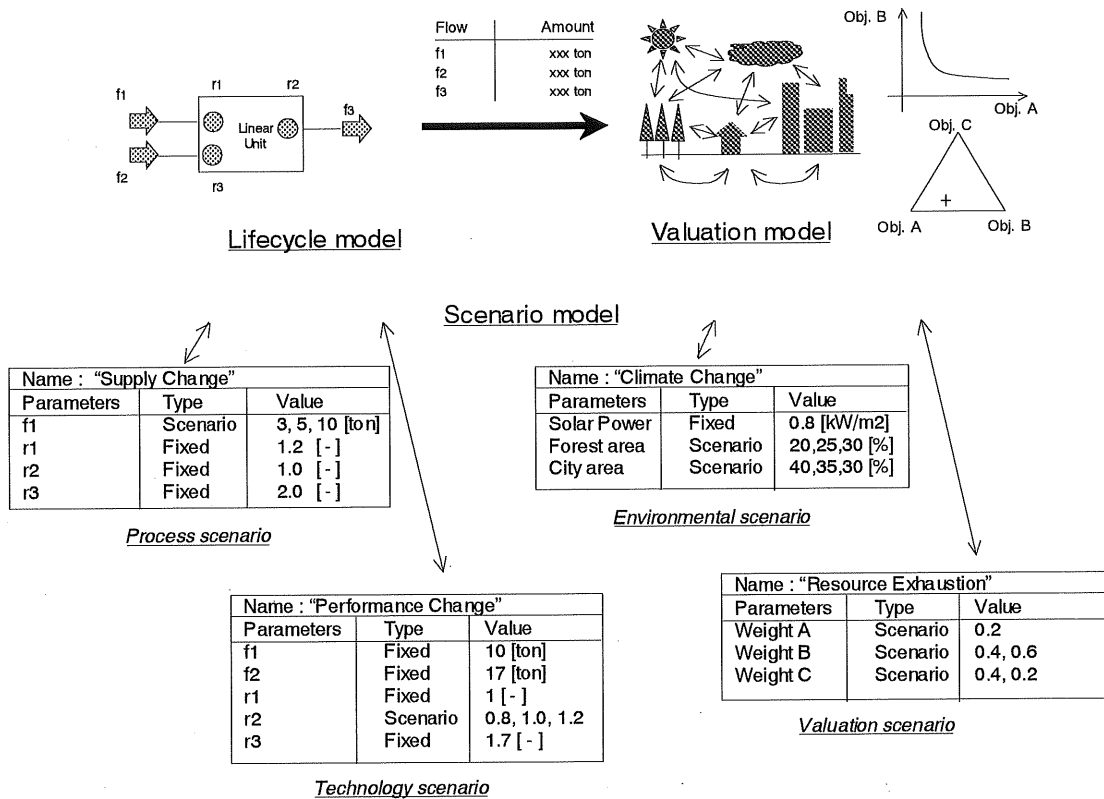


図 2: ライフサイクルモデル、影響評価モデル、シナリオモデルの関係

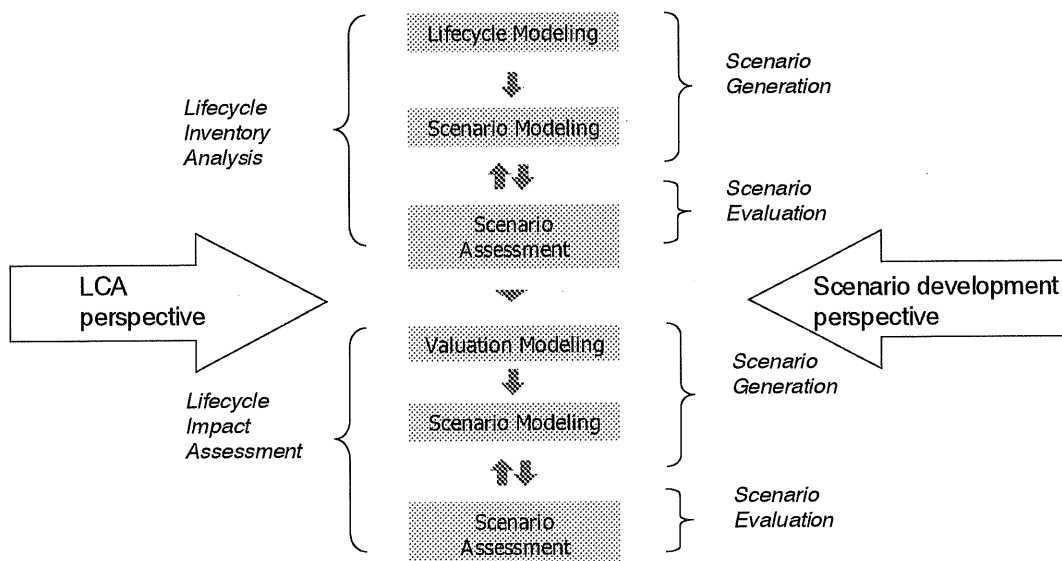
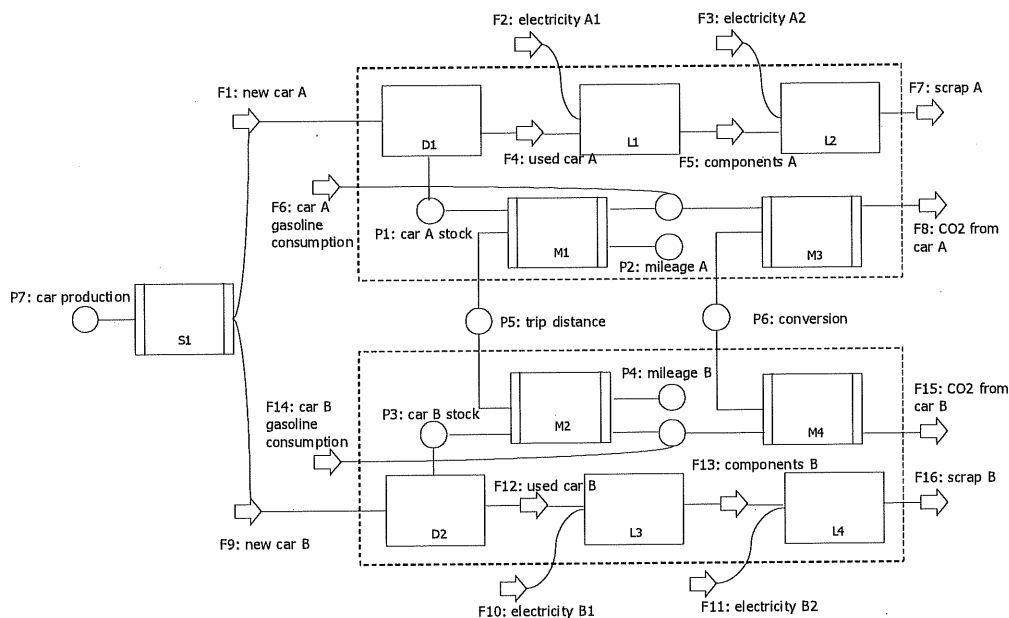


図 3: シナリオ評価型 LCA のフレームワーク

モデル記述言語 (LCML, Life Cycle Modeling Language)の開発

シナリオ評価型 LCA で構築される3種類のモデルの記述ツール(言語)として Life Cycle Modeling Language (LCML)を開発した。LCMLは、グラフによる表現、オブジェクト指向プログラミング言語 Java のライブラリによる表現、データ記述言語 XML (eXtensible Markup Language)による表現があり、これら3つの表現は同じモデルを表現するための異なった手段である。図4に車の置き換えシナリオのためのライフサイクルモデルの、LCML グラフ表記による記述を示す。ボックスで表現されているユニットモデルとボックス矢印で表現されているフローモデル、制約条件などを記述するパラメータモデルを接続することでライフサイクルモデルを表現する。ユニットモデルは表現すべきアクティビティに対応して複数の種類が用意されている。入力と出力の関係(方程式の種類)はユニットモデルの種類によって規定され、これらの連結が連立方程式モデルを構成している。このグラフ表記に加えて、オブジェクト指向言語 Java を用いて開発したライブラリを用いたライフサイクルモデルとシナリオモデルの記述を可能にしたことで、表記だけではなく、自動的に必要なフロー計算や自由度に応じた変数の決定計算が実行される計算モデルを構築することができる。また、汎用的なデータ記述言語であるXMLを用いたモデル記述方法を準備したことによって、特定のプログラム言語に拠らずにモデルを表現し、データの蓄積及び交換が促進される。XMLではタグを使ってデータを木構造に表現する。どのような木構造にするかはデータ構造の設計者が自由に設計できる。本研究ではライフサイクルモデル、シナリオモデル、そして影響評価モデルを表現するための木構造を設計した。この木構造の定義はXMLスキーマ定義言語 Relaxによって厳密に記述されている。



Unit	Type	Description
D1	Distribution	Car A Use
D2	Distribution	Car B Use
L1	Linear	Car A Dismantling
L2	Linear	Car A Scrapping
L3	Linear	Car B Dismantling
L4	Linear	Car B Scrapping
S1	Summation	car production = new car A + new car B
M1	Multiplication	car A stock × trip distance = mileage A × car A gasoline consumption
M2	Multiplication	car B stock × trip distance = mileage B × car B gasoline consumption
M3	Multiplication	car A gasoline consumption × conversion = CO2 from car A
M4	Multiplication	car B gasoline consumption × conversion = CO2 from car B

図4 LCML グラフ表記の例 (車の置き換えシナリオ)

支援ソフトウェア「Lifecycle Modeler」の開発

LCML を用いたシナリオ評価型 LCA の実施を支援するためのソフトウェアを開発した。このソフトウェアでは LCML のグラフ表現を図 5 のような GUI 上で描くことによってライフサイクルモデルを構築することができる。また、グラフ表現をもとに対応する Java 表現によるモデルを自動的に構築し、設定したシナリオモデルに対応したフロー計算(連立方程式計算)を実行できる。Lifecycle Modeler は図 5 のように LCML のグラフ表現と Java 表現、そして XML 表現を可換にする。

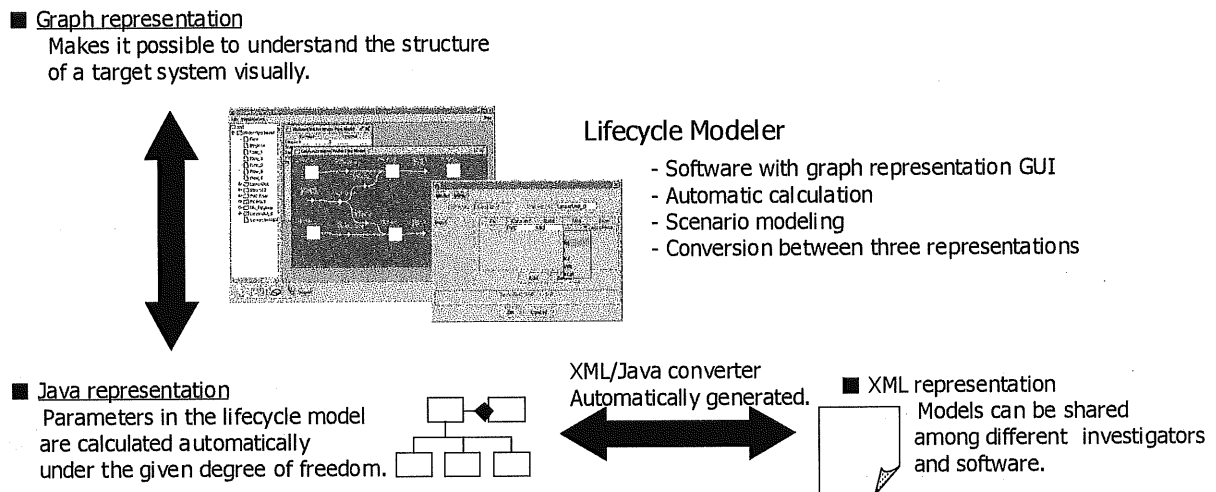


図 5 ライフサイクルモデラーと LCML の 3 つの表現形式

シナリオ評価型 LCA における知識集積メカニズム

シナリオ評価型 LCA の実施を支援する方法として、上記のようなツールの開発以外に、知識の蓄積方法および媒体について考察し、必要な機能を実装した。具体的にはモデル自体の再利用性を高めること、及びモデル化の方法や評価結果の解釈方法などに関する知識を集積することで実現できる。シナリオ評価型 LCA のフレームワークでは、全体を 3 種類のモデルの組合せによって表現しライフサイクルモデルと影響評価モデルの再利用性の向上を図っている。また、事例の蓄積に LCML のような共通言語を用いることで、蓄積された事例集の利用効率が高められる。さらに、LCML および Lifecycle Modeler には、複数のモデル間での命名の相違の吸収を実現する仕組みが実装されている。これによって、他の事例で蓄積された複数のモデルを組み合わせる際に生じる不整合を解消できる。これらの仕組みによって再利用性の高まったライフサイクルモデル、および影響評価モデルを蓄積し、シナリオデータベースを構築することで、将来の解析における負荷を低減することが期待できる。また、個々のシナリオ評価型 LCA 事例のモデルから、より抽象的なレベルで共通するパターンを抽出することで、新たに構築するモデルにそれらのパターンを適用してモデルの新規開発コストを低減することができる。パターンは、LCML のモデル要素(ユニット)追加による拡張と、パターンカタログ作成の 2通りの方法によって蓄積される。多くのモデルの中で繰り返し用いられるようなユニットの組合せは、新たなユニットを定義することでそのパターンを簡潔化し、再利用性を高めることができる。このための新たなユニットの自己定義が可能な仕組みを LCML は備えている。パターンカタログによる方法では、ライフサイクルモデル、影響評価モデルのモデル化に関するパターン、それから結果の解釈に関するパターンをカタログ化し、新たにシナリオ評価型 LCA を実施する際にこのカタログを参照することで、モデル化および結果の解釈にかかる労力を低減できるようになる。ここまでに述べたシナリオ評価型 LCA の手順、ツ-

ルおよび知識集積メカニズムを IDEF0 アクティビティモデルを用いて記述し、シナリオ評価型 LCA の実施の詳細と、付随して継続的に知識が集積されていく仕組みの全体像を示した。この記述の一部を図 6 に示す。

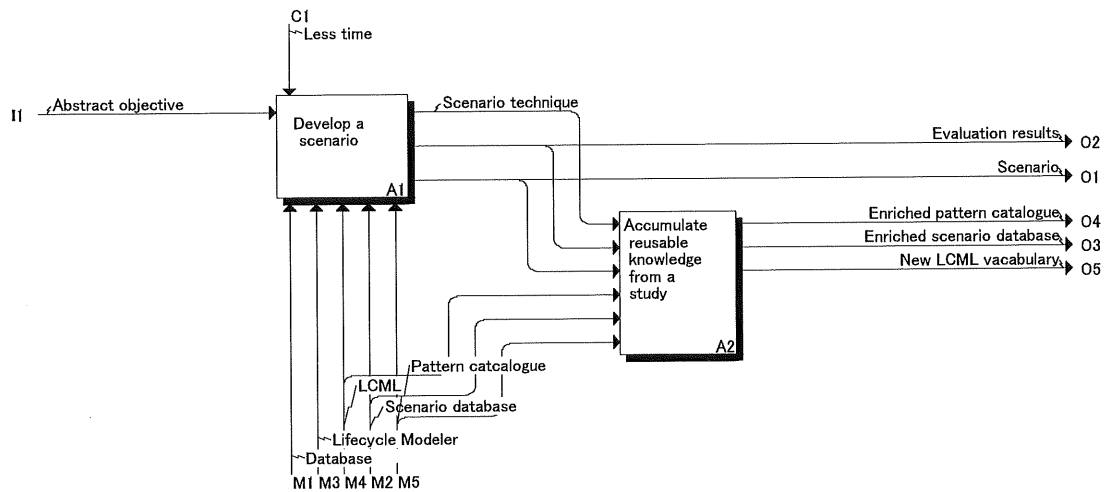


図 6 シナリオ評価型 LCA の IDEF0 アクティビティモデルの例

情報システム

LCA では組織の枠を越えたインヴェントリデータの取得が必要である。また、影響評価モデルの構築のために、様々な要素モデルを動的に組み合わせることが必要である。このような、データとツールの共有は、LCA のみならず様々な場面で必要とされるようになってきている。本研究では、このような要求にこたえるライフサイクル工学のための情報基盤システム DOLCE(Distributed Object environment for Life Cycle Engineering)と、これを用いたシナリオ評価型 LCA の支援システムを設計した(図7)。情報基盤には、モデルやデータベースの提供するサービスをネットワークを通じて利用し、それらを動的に追加し保守することが可能な分散オブジェクトシステムを採用した。但し、シナリオ評価型 LCA で得られる時系列インヴェントリデータから環境影響評価を実行するような手法は現時点では確立されておらず、ダイナミズムを伴った評価を得るためにはインヴェントリデータそのものを用いる必要がある。

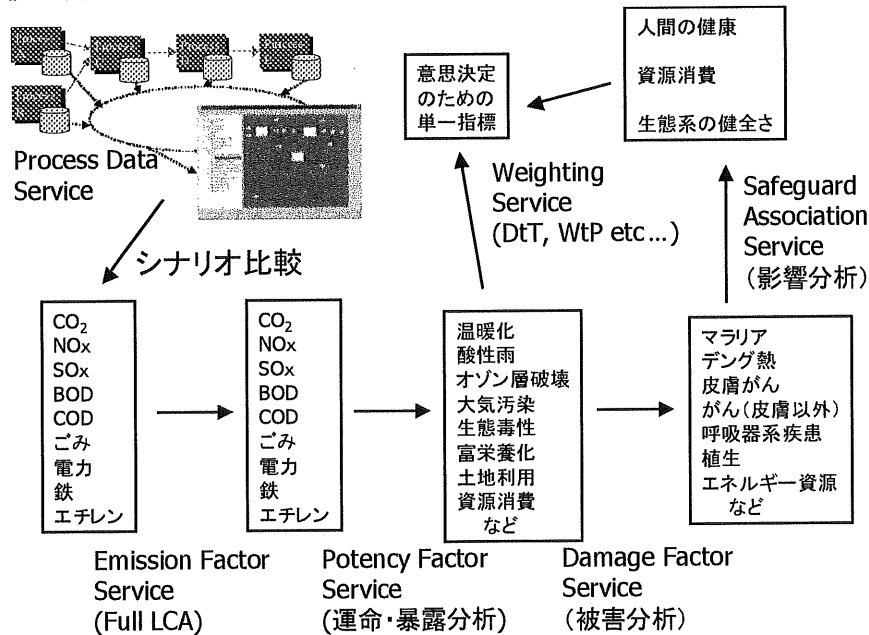


図 7 シナリオ評価型 LCA のための情報システム