

# 船舶用 LCA 解析ソフトウェアの開発

環境・エネルギー研究領域 \* 田内 宏明、亀山 道弘、平岡 克英

## 1. はじめに

船舶の LCA 解析では船舶のライフサイクルとして、建造、運航、解体及びリサイクルを対象範囲とする必要がある。しかし、ライフサイクルの各段階での多岐にわたる作業の実施に加え、使用する数万の素材や部品の製造及び多様な船舶の仕様や運航方法等を含めると、船舶のライフサイクルは複雑かつ多種多様である。

また、LCA 解析の実施には、LCA 解析の専門的知識に加え、解析対象の製品やサービスとは直接関係しない各種の素材やエネルギーの製造工程も把握することが必要となる。そのため、船舶関係者が船舶の LCA 解析を的確に実施するためには、LCA 解析手法や関連データの整備を支援する解析ソフトが必要と考えられる。本研究で試作した船舶用の LCA 解析ソフトを以下にまとめる。

## 2. 船舶用 LCA 解析ソフト

### 2.1 目的と機能

本解析ソフトは船舶のライフ・サイクル・インベントリ(LCI)分析及びインパクトアセスメント(LCIA)を実施する解析ソフトである。各種船舶の建造、運航、解体及びリサイクルの各段階を対象とし、段階毎又はライフサイクルを通じたインベントリ分析及びインパクト評価を実施し、解析結果を印刷又は登録する機能を持つ。

また、本解析ソフトは LCA 解析の実施に必要なデータの入力作業を支援する機能と共に、船舶仕様、各種のプロセスデータ及び製造インベントリデータ等を登録、管理するデータベースの機能を有する。

### 2.2 範囲

LCA 解析では資源の採取から製品の最終的な処理までの、言わば製品の「揺りかごから墓場ま

で」における資源の消費や環境中への排出物による環境影響を解析の対象とする。本解析ソフトで解析対象とするシステム境界を図 1 に示す。

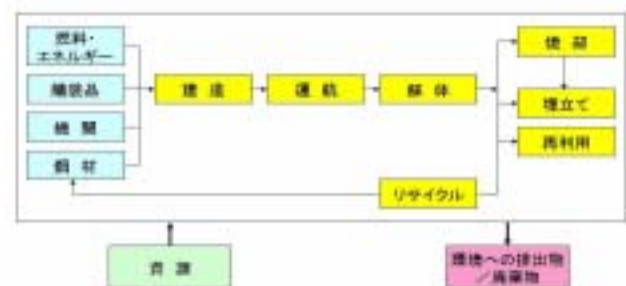


図 1 船舶のライフサイクルとシステム境界

解析はライフサイクルの各段階での最小技術単位(プロセス)に基づいて行われる。なお、各プロセスで消費する経済的入力項目の素材、エネルギー及び部品等の製造に関するデータは、製造インベントリデータとして解析処理されたデータを使用し、個々の製造工程や輸送等の詳細なプロセスは解析の対象としない。

また、船舶の解体により回収される中古部品の再利用、鋼材リサイクルで生産される伸鉄材の使用及び金属スクラップのリサイクルは解析の対象とはしない。

### 2.3 構造

本解析ソフトは LCA 解析を実施する解析処理部と解析に使用する各種データを管理するデータベースから構成される。本解析ソフトの解析処理部を図 2 に示す。解析処理部では船舶毎に建造、運航、解体及び鋼材のリサイクルの各段階並びにライフサイクル全体の解析を各々実施する。また、データベースでは船舶仕様、プロセスデータ及び解析条件等のデータセットの登録、修正及び削除等を行う。

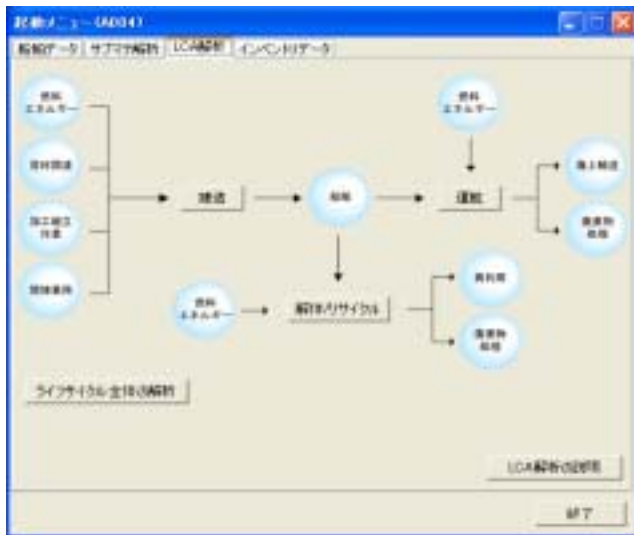


図 2 船舶用 LCA 解析ソフトの構成

解析処理部では、各段階での作業計画や解析対象の環境影響を指定する環境インジケータの入力、解析の実施、解析結果の印刷及びデータベースへの登録等を行う。また、船舶のライフサイクル全体の解析は各段階の解析結果に基づいて実施される。

データベースに含まれる解析対象の船舶の仕様、プロセスデータ及び解析条件等のデータセットの項目を表 1 に示す。

表 1 データベース項目

	区分	項目
1 船舶データベース(船舶仕様)	船舶主要目	船名、トン数、寸法、速力、機関出力
	船舶重量構成	船体、船材、機関重量
	航行と荷役性能	航海条件、荷役条件
2 プロセスデータ	製造(エネルギー・燃料)	電力、ガス、パンカー油、潤滑油
	製造(素材)	鉄、非鉄金属、プラスチック
	製造(船舶部品)	船殻、船装品
	製造(その他の装置)	ディーゼル機関、ボイラー
	使用(船舶部品)	工場設備、沿岸設備
	使用(その他の装置)	切断、溶接、塗装、曲げ
	作業(素材加工)	トランク、船舶
	作業(輸送)	焼却、埋立、リサイクル
	作業(排出物処理)	造船所、船会社
	作業(労力)	作成したインジケータ
3 LCAデータベース	環境インジケータ	地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性化
(1)解析する環境影響	環境影響項目	タンカー、積積貨物船、コンテナ船
(2)使用するテンプレート	タイプシッ	建造、運航、解体、材料リサイクル
	システムモデル	造船所
	資料調達モデル	造船所
(3)自然からの入力項目	天然資源	原油、鉄鉱石、石炭、天然ガス
	スクラップ	鉄、銅、アルミニウム
(4)その他	単位換算	μg, mg, g, kg, ton, J, MJ

## 2.4 解析方法

本解析ソフトで実施する解析は、インベントリ分析(コスト解析含む)、インパクト評価、感度分析、マテリアル分析・サブスタンス分析である。

### 2.4.1 インベントリ分析

インベントリ分析では製品のライフサイクルにおいて全ての消費資源や排出物を定量的に把握す

る。本解析ソフトではプロセスデータの積み上げによりインベントリ分析を行う。また、船舶のライフサイクルの各段階のプロセスフロー等に基づいて作成されたプロセス行列を構成する標準的なプロセスの種類とプロセス量はプロセスフローとしてテンプレート化され、データベースに登録されている。また、廃棄物処理は排出物の種類に応じて各段階で設定した廃棄シナリオに基づいて解析される。

解析で使用するプロセスデータはプロセスフローで指定されたプロセスの種類に基づいてデータベースの中から選択する。本解析ソフトでは1つのプロセスの種類に対して複数のプロセスデータを割り付けて指定することができる。プロセス行列は指定されたテンプレートとプロセスの種類に基づいてプロセスデータの積み上げを繰り返して作成される。

船舶の各段階でのインベントリ分析の目的とした機能単位は、建造(隻)、運航(ton-km)、解体(隻)、鋼材リサイクル(ton)、ライフサイクル(ton)である。

インベントリ分析の対象となる環境中への排出物や天然資源の消費量等の環境負荷項目は、環境インジケータを選択することで指定される。

船舶の各段階におけるコストは解析結果から得られるプロセス量に基づいて算出される。

### 2.4.2 インパクト評価

有害化学物質等の環境中における拡散、吸収・蓄積による被害等に基づいて人体・生態系への影響をリスク等の定量的な指標により評価を行う。本解析ソフトでは、ISO に準拠し、以下の手順で実施する。<sup>1)</sup>

分類化(Classification)

特性化(Characterization)

正規化(Normalization)

重み付け(Weighting)

#### (1)分類化

インベントリ分析により算出した環境負荷項目(インベントリデータ)を環境影響項目に割り当てる。本データベースに登録した環境影響項目を表 2 に示す。<sup>2)3)</sup>

表 2 環境影響項目

	Class 環境影響項目	Unit 単位	出典
1	Depletion of abiotic resource 非生物資源の枯渇	ADP (kg antimony eq./kg)	167頁 ADP (Guinee et al. 2001)
2	Climate change 地球温暖化	GWP100 (kg CO <sub>2</sub> eq./kg)	185頁 388頁
3	Stratospheric ozone depletion オゾン層の破壊	ODP (kg CFC-11 eq./kg)	188頁
4	Human toxicity 人に対する毒性	HTP(inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	190頁 HTP inf.(Huijbregts, 1999 & 2000)
5	Freshwater aquatic ecotoxicity 淡水生態毒性	FAETP(inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	228頁 FAETP inf.(Huijbregts, 1999 & 2000)
6	Marine aquatic ecotoxicity 海洋生態毒性	MAETP(inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	228頁 MAETP inf.(Huijbregts, 1999 & 2000)
7	Freshwater sedimental ecotoxicity 淡水堆積生態毒性	FSETP(inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	228頁 FSETP inf.(Huijbregts, 1999 & 2000)
8	Marine sedimental ecotoxicity 海洋堆積生態毒性	MSETP(inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	228頁 MSETP inf.(Huijbregts, 1999 & 2000)
9	Terrestrial ecotoxicity 陸上生態毒性	TETP(inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	228頁 TETP inf.(Huijbregts, 1999 & 2000)
10	Photo-oxidant formation 光化学オキシダントの生成	POCP (kg ethylene eq./kg)	332頁 POCP(Jenkin & Hayman, 1999, Derwent et al. 1998; high Nox)
11	Acidification 酸性化	AP (kg SO <sub>2</sub> eq./kg)	344頁 AP(Hauschild & Wenzel (1998)
12	Eutrophication 富栄養化	EP (kg PO <sub>4</sub> --- eq./kg)	348頁 EP(Heijungs et al. 1992)
13	Odour 臭気	1/OTV (m3/kg)	351頁 1/OTV
14	MOE First class chemical substances 環境省 第1種指定化学物質	kg	
15	MOE 2nd class chemical substances 環境省 第2種指定化学物質	kg	

出典 ( ) は、データ更新日を考慮し、システムに登録したデータ。

	Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards, Jeroen B. Guinee(ED.), Kluwer Academic Publishers, [ISBN1-4020-0228-9(HB), ISBN1-4040-0557-1(PB)]
	ライデン大学HP http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/projects/cac2/charac.html
	IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001: The Scientific Basic http://www.grida.no/climate/ipcc/tar/wq1/index.htm
	モニタリング計画(国連環境計画(UNEP)HPより) http://www.unep.ch/ozone/Handbook2003.shtml
	Handbook for International Ozone Treaties - 6th edition (2003) [ISBN 92-807-2316-2]
	環境省HP http://www.env.go.jp/chemi/prtr/db/index.html

## (2)特性化

各環境負荷項目のインベントリ分析の結果を設定された特性係数と掛け合わせて合計し、環境影響項目スコアを算出する。環境負荷項目の一つである地球温暖化の特性化係数を表 3 に示す。<sup>3)4)</sup>

表 3 特性化係数

2. 地球温暖化(Climate change) Unit: GWP100(kg CO<sub>2</sub> eq./kg)

Substance	Compartment	CAS number	GWP100
Carbon dioxide(CO <sub>2</sub> )	air	124-38-9	1
Methane(CH <sub>4</sub> )	air	74-82-8	23
Nitrous oxide(N <sub>2</sub> O)	air	10024-97-2	296
CFC-11	air	75-69-4	4600
CFC-12	air	75-71-8	10600
CFC-13	air	75-72-9	14000
CFC-113	air	26523-64-8	6000
CFC-114	air	1320-37-2	9800
CFC-115	air	76-15-3	7200
HCFC-21	air		210

備考

物質: 93項目、下線が基準とした物質、区分: air

GWP100: Global Warming Potential(100-year time)

出典: Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards,185頁  
IPCC Third Assessment Report - Climate Change 2001: The Scientific Basic,388頁

## (3)正規化

環境負荷項目スコアが、環境影響項目に対して相対的にどの程度関与しているかを求める。本解析ソフトでは正規化のための基準値を輸送量 ton-km 当たりの排出物等の許容量(ton-substance / ton-km)とした。

## (4)重み付け

各環境影響項目に相対的な重み付け係数を設定し、各環境影響項目の正規化の結果にその重み付け係数を掛け合わせ、統合化指標(環境インジケ-

タ)を算出する。本解析システムでは、各環境影響項目の重み付けを任意に割り付けた環境インジケータを登録し、評価を行う。

## 2. 4. 3 感度分析

インベントリ分析の解析結果に基づいて、ISO14040 で規定される解釈を行うための手法として、感度分析を行うことができる。感度分析の感度として、変動率感度を用い、項目間での相対的な比較を直接行うことができる。

## 2. 4. 4 マテリアル分析・サブスタンス分析

商品・素材等の材料構成調査結果であるマテリアルリストや、有害性化学物質(PRTR 法対象物質、使用禁止物質、使用量削減物質、排出抑制物質)の有無の調査結果であるサブスタンスリストは、設計、使用、廃棄あるいはリサイクルする際の環境影響情報として重要である。本解析システムでは、材料や部品のマテリアルリストとサブスタンスリストに基づいて、船舶仕様(重量構成表)において部品や材料の船舶での位置を入力することによりマテリアルリストとサブスタンスリストを作成し、船舶を構成する材料の種類や船舶に含まれる有害化学物質の種類、重量そしてその位置を特定する。

## 2. 5 データベースの詳細

### 2. 5. 1 船舶仕様データ

船舶仕様に関するデータとしてデータベースに収集する項目を以下に示す。

#### (1)船舶主要目

船舶の寸法及び主な搭載機関の種類等を船舶主要目の対象とした。

#### (2)重量構成表

解析に使用する船舶重量は軽荷重量(Light weight: LW)を基準とした。軽荷重量を構成する部品や装置をその機能に応じて船殻、機関艀装、船体艀装(非居住区)、船体艀装(居住区)及び電気艀装に区分した。各重量区分に含まれる部品の分類の概要を表 6 に示す。

表 6 船舶部品の分類

船殻	機関艙装	船体艙装(非居住区)
1.船殻材料	1.主機関	1.係船装置
2.船体ブロック	2.軸系	2.ハッチカバーと積付装置
3.船殻付属装置	3.発電機・非常用発電機	3.荷役装置
4.溶接と接合	4.ボイラー・排ガスエコマイザー	4.マスト・ポスト
5.塗装	5.機関機械	5.換気装置(船体)
6.電気防食・防汚装置	6.台	6.操舵装置
7.名前・マーク	7.機関管材	7.防火装置
8.その他の船殻	8.機関輔装置	8.船体部配管
	9.その他の機関艙装	9.その他の船体艙装(非居住区)

船体艙装(居住区)	電機艙装
1.居住区配管	1.配線
2.換気装置(居住区)	2.電力供給系統
3.内張り間仕切り、敷物と防熱材	3.機器自動化系統
4.居室設備	4.無線、通信、航海計器
5.倉庫設備と積荷冷凍庫	5.照明と一般電源装置
6.窓、採光装置	6.その他の電気艙装
7.救命装置	
8.船体部補装	
9.その他の船体艙装(居住区)	

### (3)航行 & 荷役性能

異なる運航状態を考慮し、船舶自身の航海条件での航海速度と主機関等の機関の負荷率、また荷役条件での荷役速度と主機関等の機関の負荷率を設定の対象とした。

## 2.5.2 プロセスデータ

プロセスデータとしてデータベースに収集するデータ項目を以下に示す。

### (1)種類

プロセスデータのうち、素材・燃料、エネルギー及び部品・装置は資源の採掘から製品の製造工程までを対象とした製造インベントリデータである。素材加工、機器/設備の使用及び輸送は最小技術単位のプロセスデータである。排出物処理は排出物の種類に応じて処理のシナリオを定めたシステムデータである。

## 2.5.3 他のデータセット

解析条件に関するデータセットとしてデータベースに収集するデータ項目を以下に示す。

### (1)環境影響

環境影響項目と環境インジケータを対象とする。環境影響項目のデータセットは環境負荷項目となる排出物等とその特性化係数から成る。また、環境インジケータのデータセットは重み付けさせた複数の環境負荷項目である。

### (2)テンプレート

ライフサイクルの各段階の解析で使用する作業量等の計画データをテンプレートとしてデータベースに登録し、解析時のデータ入力作業を簡素化する。データベースに登録する各種のテンプレ

ートの内容を以下に示す。

### (a)タイプシップ

対象船舶の重量構成データの入力を簡易化するため、タイプシップをテンプレートとして登録する。解析の対象船舶の重量構成は選定されたタイプシップの軽荷重量に比例した重量構成となる。

### (b)システムモデル

建造、運航、解体及び鋼材リサイクルの各段階での作業計画として、プロセスの種類とそのプロセス量をモデル化したデータセットを登録する。システムモデルを使用することで、対象船舶のプロセスの種類とプロセス量は、選定されたシステムモデルに準拠したデータセットを作成する。

### (c)資材調達

運航を除く建造、解体及び鋼材リサイクルでの資材調達を対象とし、代表的な資材の調達先からの輸送距離と輸送方法をデータセットとして登録する。

### (3)自然からの入力

プロセスデータの環境中からの入力項目に可能な天然資源とスクラップの種類を登録する。本データセットによりインベントリ分析で使うことができる天然資源とスクラップの種類を決める。

### (4)その他

単位換算は2つの単位の間を記述するデータセットである。

## 2.6 解析ソフトの使用

本解析ソフトの使用法の概略と解析時の入力作業を以下に示す。

### 2.6.1 デモンストレーション機能

船舶のLCA解析を本解析ソフトで実施する場合の具体的な実施手順は本解析ソフトにあるデモンストレーション機能を利用して理解できる。

### 2.6.2 データ入力

船舶のライフサイクルの各段階での解析作業では、素材加工等の主たる作業に加え、資材調達、一般管理及び廃棄物処理シナリオに関する計画データの入力作業を行う。なお、これらの入力作業はテンプレートの使用により作業を軽減できる。



[illegible][illegible]

入力作業では、テンプレートで指定されたプロセスの種類毎に総プロセス量及びその内訳としてプロセスの詳細な種類と作業量の割り付けを行う。解体及び鋼材のリサイクルの作業工程の入力データの形式は建造と同じである。また、船舶のライフサイクル全体の解析は、各段階の解析結果を指定し、解析を実施する。

船舶毎に建造、運航、解体及び鋼材のリサイクルの各段階を対象とし、段階毎又はライフサイクルを通じたインベントリ分析及びインパクト評価を実施した解析結果を出力する。建造における解析結果画面の一例を図 5～図 6 に示す。



TS76Baller調査Ver1.0 作業分類ごとの環境負荷量 (CO2 総量: 9.93E+02 t)

作業分類	割合 (%)
製造工程環境保護	23.3%
製造工程の他の機器・設備	14.4%
製造工程の他の材料加工	10.2%
製造工程の他の材料搬入	10.1%
製造工程の他の材料搬出	10.1%
製造工程の他の材料搬入	10.1%
製造工程の他の材料搬出	10.1%

図 6 建造の解析結果出力例(2)

本解析ソフトを使用する場合の使用環境を以下にまとめる。

本解析ソフトはスタンドアロンでのパソコンの使用を前提として作成した。ネットワーク等を利用したソフトの共同利用は考慮されていない。

解析が可能な総プロセスは部品データを含め、約 10,000 プロセス(メモリ 2 GB 相当)とした。パソコンの搭載しているメモリが少ない場合は、解析時間を著しく必要とする場合がある。

### (3) インストールソフト

本解析ソフトを利用するためには、使用するパソコンのオペレーティングシステム(OS)として Windows2000 または WindowsXP を使用し、Microsoft .NET Framework Version 1.1 再頒布可能パッケージ、Microsoft Access2000(及びその上位互換)及び Microsoft Excel2000(及びその上位互換)がインストールされている必要がある。

### (4) データベース

船舶の本格的な LCA 解析を実施するためには、解析目標に応じた的確な各種のプロセスデータを収集し、データベースに登録する等の作業を必要とする。プロセスデータの登録画面を図 7～図 9 に示す。

図 7 プロセスデータ(インプット/アウトプット)の登録

図 8 プロセスデータ(マテリアル/サブスタンス)の登録

図 9 プロセスデータ(コメント、典等)の一般情報)の登録

## 3. まとめ

船舶用 LCA 解析を実施する解析ソフトを試作した。多くの部品の入力方法や排出物の処理等の課題もあるが、本格的な船舶用の解析ソフトの構築に発展させるための基本的な機能を備えることができたと考えられる。船舶の LCA 解析を的確に実施できる本格的な解析ソフトへの発展には、感度解析や不確実性解析等の解析手法の高度化、多量の入力データの効率的かつ的確な入力方法の確立、素材や部品等の製造インベントリデータ及び素材加工や機関の運転等のプロセスデータの整備等を行うことが重要である。

## 参考文献

- 1) LCA 実務入門、LCA 実務入門編集委員会、1998 年 8 月 17 日初版、発行 (社)産業環境管理協会、ISBN:4-914953-47-1 LCA
- 2) 製品の環境ライフサイクルアセスメント
- 3) Handbook on Life Cycle Assessment, Operational Guide to the ISO Standards
- 4) 環境省 HP、  
<http://www.env.go.jp/chemi/prtr/db/index.html>