

船舶 LCA 解析のための素材加工データ

環境・エネルギー研究領域 *成瀬 健、亀山 道弘

1. はじめに

船舶建造の LCA を実施するためには、各工程における入出力（投入される資材、エネルギーおよび排出物）を正確に把握する必要がある。しかし、一般的に造船所では、投入される資材については、工程単位でその数量を管理しているものの、使用されるエネルギー（電力、ガス等）および排出物（廃棄物）については、工場全体で管理しており、工程単位でその数量を把握していない。したがって、造船所で LCA を実施するためには、各工程のプロセスデータ（ある単位の作業を行う際に必要となる資材、エネルギーおよび排出物の標準的な数量関係を表すデータ）を整備して、それをもとに解析を行うことが必要になる。

本来、プロセスデータは、各造船所の実態に合わせて整備すべきものである。しかし、必要なすべてのデータを個々の造船所で整備することは労力を要し、LCA 導入を難しくすることから、海上技術安全研究所では、少しでもそれを容易にするため、文献等から求められる範囲で標準的なプロセスデータを作成し、開発中の船舶 LCA 解析ソフトウェアにバックグラウンドデータとして整備しているところである。LCA に使用するデータには客観性が要求されることから、ここにその計算方法の概略を述べる。

2. 整備したプロセスデータの種類

2.1 溶接

造船では、炭酸ガスアーク溶接が最も多く、それに加えてサブマージアーク溶接、被覆アーク溶接が行われている¹⁾。また、少量であるものの TIG 溶接も行われている。したがって、これらを対象とした。データ項目は、入力を溶接金属、電力およびシールドガス（CO₂ および Ar）とし、出力を固形排出物（溶接金属残材およびスラグ）、ヒュームに含まれる物質（PRTR の対象となっている Cr、Ni、Mn および Mo とそれらの化合物）およびシールドガス（CO₂ および Ar）とした。

2.2 切断

造船では、鋼板の切断は、プラズマ切断およびガス切断により行われている。プラズマ切断については、一般的なエアプラズマおよび酸素プラズマを対象とし、ガス切断については、燃料に、それぞれプロパン、アセチレンおよび LNG を用いる場合を対象とした。

データ項目は、プラズマ切断では、入力を電力、水および酸素とし、出力をスラグ（ドロス）、水および酸素とした（酸素は酸素プラズマ切断の場合のみ）。ガス切断では、入力を燃料（プロパン、アセチレンおよび LNG）および酸素とし、出力を CO₂、水、酸素およびスラグとした。

2.3 熱曲げ

熱曲げは、曲面の多様性、職人による作業手順の差等の問題があり、標準的なプロセスデータ作成は難しい。ここでは、精度的に不十分であるものの、造船所のエネルギー年間使用量をもとに鋼材使用量 1ton あたりの入力（燃料および酸素消費量）および出力（CO₂ 排出量）を計算してプロセスデータとした。

2.4 塗装

造船の塗装には、ショッププライマー、スプレーによる吹付塗装、はけ塗装等がある。ここでは、造船で最も多用されているエアレススプレーによる吹付塗装を対象とした。データ項目は、入力を塗料、シンナーおよび電力の消費量とし、出力を大気への排出である未着塗料、シンナーおよび塗料中の揮発成分とした。

3. 計算方法

3.1 溶接

溶接データの計算方法は、溶接金属、電力およびシールドガスについてはコスト算出方法に関する文献²⁾を、溶接金属残材量およびヒュームに含まれる大気への排出物質は、PRTR 計算方法に関する文献³⁾を参考にした。計算に使用した溶接条件は、溶接に関する文献⁴⁾⁵⁾を参照した。

(1) 入力

溶接金属消費量

溶接金属消費量は、すみ肉又は開先の体積から必要な溶着金属量を求め、その溶着効率および残材率から次式により計算した。溶着効率、残材率等の値は文献²⁾³⁾⁶⁾を参照した。

$$\begin{aligned} & \text{溶接金属消費量(kg)} \\ & = \text{溶着金属量(kg)} / \text{溶着効率} / (1 - \text{残材率}) \quad (\text{式1}) \end{aligned}$$

電力消費量

電力消費量は、溶接条件⁴⁾⁵⁾の電流値および電圧値を使用し、電流値と溶着速度の関係に関する文献²⁾⁴⁾⁵⁾から設定電流値における溶着速度を推定し、次式によりアークタイムを求めて計算した。

$$\begin{aligned} & \text{アークタイム(min)} \\ & = \text{溶着金属量(g)} / \text{溶着速度(g/min)} \quad (\text{式2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{電力消費量(kWh)} \\ & = \text{電流(A)} \times \text{電圧(V)} \times \text{アークタイム(min)} / 1000 / 60 \quad (\text{式3}) \end{aligned}$$

シールドガス消費量

また、シールドガス(CO₂およびAr)消費量は次式により計算した。ここで、係数 1.1 は、アフターフローを考慮したものである。

$$\begin{aligned} & \text{シールドガス使用量(l)} \\ & = \text{アークタイム(min)} \times \text{ガス流量(l/min)} \times 1.1 \quad (\text{式4}) \end{aligned}$$

(2)出力

溶接金属残材量およびスラグ発生量

溶接金属残材量およびスラグ発生量は、それぞれ次式により計算した。式 6 中の係数 1.365 は、酸化による重量増加を考慮したものであり、後述の式 17 から求めている。

$$\begin{aligned} & \text{溶接金属残材量(kg)} \\ & = \text{溶接金属消費量(kg)} \times \text{残材率} \quad (\text{式5}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{スラグ発生量(kg)} \\ & = (\text{溶接金属消費量(kg)} - \text{溶着金属量(kg)}) \times 1.365 \quad (\text{式6}) \end{aligned}$$

ヒューム

ヒュームに含まれる物質量は次式により計算した。ここで、Cr、Ni、Mn および Mo のヒュームへの移行率は文献³⁾を参照した。

$$\begin{aligned} & \text{ヒュームに含まれる物質(kg)} \\ & = \text{溶接金属消費量(kg)} \times \text{ヒュームへの移行率} \quad (\text{式7}) \end{aligned}$$

シールドガス

シールドガスの排出量は消費量と同じとした。

3.2 切断

3.2.1 プラズマ切断

プラズマ切断データの計算方法は、ランニングコスト算定方法に関する文献⁷⁾を参考にした。

中厚鋼板(厚さ 10~20mm)の高速切断は、150~300A のプラズマが主流であることから、切断機の定格電流を 250A に設定し、切断速度と板厚の関係に関する文献⁸⁾から切断速度を求めた。また、切断条件は文献⁷⁾を参照した。

(1)入力

電力消費量

電力消費量は次式により求めた。

$$\begin{aligned} & \text{電力消費量(kWh)} \\ & = \text{定格電流(A)} \times \text{定格電力(V)} \times \text{切断時間(min)} \\ & \quad / 1000 / 60 \quad (\text{式8}) \end{aligned}$$

ここで、切断時間は、切断面積 1m²あたりの切断時間として次式により求めた。

$$\begin{aligned} & \text{切断時間(min)} \\ & = 1(\text{m}^2) / (\text{板厚(mm)} \times \text{切断速度(mm/min)} / 10^6) \quad (\text{式9}) \end{aligned}$$

水および酸素の消費量

水および酸素の消費量は次式により求めた。

$$\begin{aligned} & \text{水消費量(l)} \\ & = \text{冷却水量(l/min)} \times \text{切断時間(min)} \quad (\text{式10}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{酸素消費量(l)} \\ & = \text{ガス流量(l/min)} \times \text{切断時間(min)} \quad (\text{式11}) \end{aligned}$$

(2)出力

スラグ

スラグの発生量は次式により求めた。ここで、係数1.365は、酸化による重量増加を考慮したものであり、後述の式17から求めている。

スラグ(kg)

=切断体積×比重×1.365

=1(m²)×カーフ幅(mm)×比重(g/cm³)×1.365 (式12)

ここで、カーフ幅は、一般的にノズル径の2.0~2.5倍である⁷⁾。

水および酸素の排出量

水および酸素の排出量は、消費量と同じとした。

3.2.2 ガス切断

ガス切断のデータは、切断時の化学反応式から各物質の重量比を求めることにより計算した。切断条件は、メーカーの火口標準能力表⁹⁾を参照した。LNGは、主成分であるメタンとして計算した。

(1)予備計算

入出力の計算に使用する単位切断面積あたりの切断時間を火口の切断速度から次式により求めた。

切断時間(min)

=1(m²) / (板厚(mm)×切断速度(mm/min) / 10⁶)

(式13)

ガス切断時の予熱における燃焼は以下の反応式により、各物質の重量比は以下ようになる。



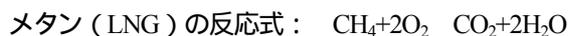
重量比 C₂H₂ : 2.5O₂ : 2CO₂ : H₂O

= 1 : 3.08 : 3.38 : 0.69 (式14)



重量比 C₃H₈ : 5O₂ : 3CO₂ : 4H₂O

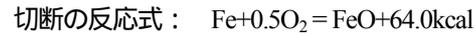
= 1 : 3.64 : 3 : 1.64 (式15)



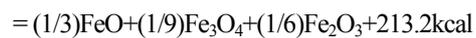
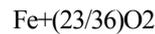
重量比 CH₄ : 2O₂ : CO₂ : 2H₂O

= 1 : 4 : 2.75 : 2.25 (式16)

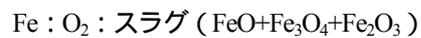
一方、切断における鉄の燃焼は以下の反応式による。



上記3種類の反応が均等に起こると仮定すると次式を得る。



ここで3種類の酸化鉄(FeO、Fe₃O₄およびFe₂O₃)をスラグとしてまとめると重量比は以下ようになる。



= 1 : 0.365 : 1.365

(式17)

(2)入力

酸素消費量(供給酸素量)

酸素消費量(供給酸素量)は次式により求めた。

酸素消費量(供給酸素量)(kg)

=予熱用酸素量(kg) + 切断用酸素量(kg) (式18)

ここで、予熱用酸素量および切断用酸素量は以下により求める。

予熱用酸素量(kg)

=予熱用酸素の流量(ℓ/h) / 60 × 酸素の密度(g/ℓ) / 1000

× 切断時間(min)

(式19)

切断用酸素量(kg)

=切断用酸素の流量(ℓ/h) / 60 × 酸素の密度(g/ℓ) / 1000

× 切断時間(min)

(式20)

燃料消費量

燃料(プロパン、アセチレンおよびLNG)の消費量は次式により求めた。

燃料消費量(kg)

=燃料の流量(ℓ/h)/60 × 燃料の密度(g/ℓ)/1000

× 切断時間(min)

(式21)

(3)出力

CO₂排出量

CO₂排出量は、式 14、式 15 および式 16 から、消費するアセチレン重量の 3.38 倍、プロパン重量の 3 倍およびメタン重量の 2.75 倍として求めた。

水の排出量

水の排出量は、式 14、式 15 および式 16 から、消費するアセチレン重量の 0.69 倍、プロパン重量の 1.64 倍でありおよびメタン重量の 2.25 倍として求めた。

酸素排出量

酸素排出量は、ノズルから供給される酸素量（供給酸素量）と予熱および切断で使用される理論酸素量との差が大気中へ未反応酸素として放出されるものとして次式により求めた。

酸素排出量 (kg)

=供給酸素量(kg)

- 予熱用理論酸素量(kg) - 切断用理論酸素量(kg)

(式 22)

ここで、予熱用理論酸素量は、式 14、式 15 および式 16 から、消費するアセチレン重量の 3.08 倍、プロパン重量の 3.64 倍およびメタン (LNG) 重量の 4 倍として求めた。

一方、切断用理論酸素量は、式 17 から鉄の重量の 0.365 倍として求めた。

スラグ発生量

スラグ発生量は、式 17 から鉄の重量の 1.365 倍として、切断部分の体積を求めて計算した。

スラグ発生量 (kg)

=切断面積(m²) × 切幅(mm) × 鉄の比重(g/cm³) × 1.365

(式 23)

3.3 熱曲げ

モデルとした造船所では、熱曲げとひずみ取りの両方にプロピレンを燃料として用いており、それらは区別されていない。ここでは、プロピレンのすべてが熱曲げに使用されたものとして、造船所の年間における鋼材消費量、プロピレン消費量および酸素消費量から鋼材 1ton あたりの入出力を計算した。

(1)入力

プロピレン消費量

プロピレン消費量は次式により求めた。

プロピレン消費量(kg)

= 年間プロピレン消費量(kg) / 年間鋼材消費量(ton)

(式 24)

酸素消費量

酸素消費量計算のため、次式により、鋼材 1ton あたりのプロピレン消費量を体積に換算した。ここで、ガス密度は 0、1atm の値を用いている。

プロピレン消費量 (体積) (m³)

= プロピレン消費量 (重量) (kg) / ガス密度(kg/m³)

(式 25)

酸素消費量は次式により求めた。

酸素消費量(kg)

= プロピレン消費量 (体積) (m³)

× プロピレンの燃焼理論酸素量 (m³/m³)

× 酸素のガス密度 (kg/m³)

(式 26)

(2)出力

CO₂排出量

CO₂排出量は、以下のプロピレンの反応式から重量比を求めて計算した。

プロピレンの反応式： $C_3H_6 + 4.5O_2 \rightarrow 3CO_2 + H_2O$

重量比： $C_3H_6 : 3CO_2 = 1 : 3.14$

(式 27)

上記重量比から CO₂排出量を次式により求めた。

CO₂排出量(kg) = プロピレン消費量(kg) × 3.14 (式 28)

3.4 塗装

塗装プロセスデータの計算は、塗料メーカーのカタログ¹⁰⁾に掲載されている塗料の固形成分体積率、密度等により行った。

(1)入力

塗料消費量

乾燥塗膜 1m³ 作るのに必要な塗料の重量(塗料消費量)

を次式により求めた。ここで、塗着効率（スプレーから噴霧した塗料が塗装物に塗着する割合）は、エアレススプレーの場合 60～70%であることから¹¹⁾ここでは 65%とした。

$$\begin{aligned} & \text{塗料消費量(kg)} \\ & = 1(\text{m}^3) / \text{固形成分体積率} / \text{塗着効率} \\ & \quad \times \text{密度}(\text{g}/\text{cm}^3) \times 10^3 \end{aligned} \quad (\text{式 29})$$

シンナー消費量

シンナー消費量は、塗料の種類、気温等の条件により異なる。ここでは単純化のため、モデルとした造船所における塗料およびシンナーの年間使用量からシンナーの平均使用率を次式により求め、その値をすべての塗料に適用した。

$$\begin{aligned} & \text{シンナー平均使用率} \\ & = \text{シンナー年間使用量(kg)} / \text{塗料年間使用量(kg)} \\ & = 0.087 \end{aligned} \quad (\text{式 30})$$

シンナー消費量は、上記のシンナー平均使用率を用いて次式により求めた。ただし、溶剤に水を使用する塗料についてはシンナー消費量を 0 とした。

$$\text{シンナー消費量(kg)} = \text{塗料消費量(kg)} \times 0.087 \quad (\text{式 31})$$

電力消費量

電力消費量の計算では、造船所で一般的に使われている塗装機のカatalog値を参照し、常用排出量 6.0(l/min)、コンプレッサー出力 5.0(ps)とした。

乾燥塗膜 1m³ 作るのに必要な塗装機の稼働時間を次式により求めた。

$$\begin{aligned} & \text{塗装機稼働時間(hr)} \\ & = (\text{塗料体積}(\text{l}) + \text{シンナー体積}(\text{l})) \\ & \quad / \text{常用排出量}(\text{l}/\text{min}) / 60 \end{aligned} \quad (\text{式 32})$$

ここで、塗料体積とシンナー体積は次式により求めた。シンナー密度にはトルエンおよび m - キシレンの密度 0.87(g/cm³)を使用した。

塗料体積(l)

$$= \text{塗料消費量(kg)} / \text{塗料密度}(\text{g}/\text{cm}^3) \quad (\text{式 33})$$

シンナー体積(l)

$$= \text{シンナー消費量(kg)} / \text{シンナー密度}(\text{g}/\text{cm}^3) \quad (\text{式 34})$$

電力消費量は、1ps = 0.735kw として次式により求めた。

$$\begin{aligned} & \text{電力消費量(kwh)} \\ & = \text{塗装機コンプレッサー出力(ps)} \\ & \quad \times \text{塗装機稼働時間(hr)} \times 0.735 \end{aligned} \quad (\text{式 35})$$

(2)出力

未着塗料

大気中への未着塗料放出量は塗着効率 65%から次式により求めた

$$\text{未着塗料(kg)} = \text{塗料消費量(kg)} \times (1 - 0.65) \quad (\text{式 36})$$

シンナー排出量

シンナーの排出量は、消費したシンナーがすべて大気に排出されるものとしてシンナー消費量と同じとした。

塗料中の揮発成分量

塗料中の大気への揮発成分量は、固形成分体積率を用いて揮発成分の体積を求めて計算した。揮発成分は塗料により異なるものの、ここでは、それらの密度をトルエンおよび m - キシレンの密度 0.87(g/cm³)で代表した。

塗料中の揮発成分量(kg)

$$\begin{aligned} & = \text{塗料中の揮発成分量(体積)}(\text{m}^3) \times \text{密度}(\text{g}/\text{cm}^3) \times 10^3 \\ & = \text{未乾燥塗料体積}(\text{m}^3) \\ & \quad \times (1 - \text{固形成分体積率}) \times \text{密度}(\text{g}/\text{cm}^3) \times 10^3 \\ & = 1(\text{m}^3) / \text{固形成分体積率} \\ & \quad \times (1 - \text{固形成分体積率}) \times 0.87(\text{g}/\text{cm}^3) \times 10^3 \end{aligned} \quad (\text{式 37})$$

4. 結果

計算結果の例として、表 1 に炭酸ガスアーク溶接のプロセスデータ計算結果を示す。ワイヤ種類、板厚等の条件ごとに各入出力項目の値を整理している。このような計算結果を、開発中の LCA 解析ソフトウェアにバックグラウンドデータとして登録している。

船舶建造インベントリ分析に関する入出力データを検

証するために、造船所全体の使用電力量を按分して求めた船舶一隻分の電力量と、個々の作業で使用する電力量を積算して求めた船舶一隻分の電力量を比較した。その際、溶接部分の消費電力量積算に、ここで整備した溶接プロセスデータ(炭酸ガスアーク溶接:脚長7mm、ワイヤ径1.2mm)を使用した。その結果、両者はほぼ一致した¹²⁾。

今後、このような検証例を増やし、データを改善していく必要がある。

5.まとめ

文献等から求められる範囲で、船舶建造工程の主要作業である溶接、熱曲げ、切断および塗装に関するプロセスデータを作成し、開発中のLCA解析ソフトウェアにバックグラウンドデータとして整備した。今後は、検証例を増やし、データを改善していくことが必要である。

参考文献

- 1) 菅:溶接材料、溶接学会誌、Vol.67 No.8(1998)、pp38-55
- 2) 炭酸ガス/マグ溶接必須かどころ、溶接技術、Vol.42 No.2(1994)、pp73-74 図2
- 3) PRTR 制度およびアーク溶接材料を対象としたPRTR 排出量等の算出方法について(その2)、溶接だより 技術ガイド Vol.42 No.392(2002)、pp1-9 表2,6

- 4) 新版接合技術総覧、(株)産業技術サービスセンター(1994)、p98 表1.20、p122 図2.15、pp128-130 表2.15-2.17、p168 表4.12、p178 図5.5、p187 表5.7-5.8、p202 図6.2.3、p204、p207 表6.2.6-6.2.7
- 5) 鈴木:最新溶接ハンドブック改訂版、山海堂(1977)、p433 表10.2、p438 表10.10
- 6) 藍田:フラックス入りワイヤの実践的選び方、溶接技術、Vol.36 No.2(1988)、p89 表3、p90 図2
- 7) カタログ集 <新版>プラズマ切断装置、(社)日本溶接協会 ガス溶断部会 技術委員会、平成7年5月、p30、p54 表2.2、p64
- 8) プラズマ切断機利用の要点と切断機器の管理・取扱い講習会テキスト、(社)日本溶接協会 ガス溶断部会 技術委員会、p92 図7.1
- 9) 小池酸素ガス工業(株):切断火口標準能力表
- 10) 中国塗料株式会社:船舶製品一覧表
- 11) (社)日本化学工業会等:PRTR セミナー補足説明資料 塗装工程排出量等算出マニュアル
- 12) 亀山 他:船舶へのLCA適用研究、平成15年度環境保全研究成果集、環境省総合環境政策局(掲載予定)

表1 炭酸ガスアーク溶接のプロセスデータ計算結果

溶接方法	条件					プロセスデータ計算結果(溶接線長1mあたりの入出力)									
	ワイヤ種類	姿勢	板厚 (mm)	脚長 (mm)	ワイヤ径 (mm)	入力			出力						
						溶接金属消費量 (kg)	電力消費量 (kwh)	CO2消費量 (ℓ)	固形排出物		大気への排出(ヒュームに含まれる物質)				大気への排出(ガス)
								溶接金属 残材 ×10 ⁴ (kg)	スラグ ×10 ² (kg)	Crおよびその化合物 ×10 ⁴ (kg)	Niおよびその化合物 ×10 ⁴ (kg)	Mnおよびその化合物 ×10 ³ (kg)	Moおよびその化合物 ×10 ⁴ (kg)	CO2排出量 (ℓ)	
炭酸ガスアーク溶接	スラッグ(ヘタニア)系入りワイヤ	水平隅肉	4	1.2	0.12	0.14	27	2.2	3.3	3.9	1.9	4.3	1.9	27	
				1.6	0.12	0.17	21	2.2	3.3	3.9	1.9	4.3	1.9	21	
			5	1.2	0.19	0.22	37	3.4	5.2	6.0	3.0	6.8	3.0	37	
				1.6	0.19	0.28	30	3.4	5.2	6.0	3.0	6.8	3.0	30	
			6	1.2	0.27	0.32	53	4.9	7.5	8.7	4.3	9.8	4.3	53	
				1.6	0.27	0.41	42	4.9	7.5	8.7	4.3	9.8	4.3	42	
			7	2	0.27	0.41	38	4.9	7.5	8.7	4.3	9.8	4.3	38	
				1.2	0.37	0.44	69	6.7	10.2	11.8	5.9	13.3	5.9	69	
			8	1.6	0.37	0.55	57	6.7	10.2	11.8	5.9	13.3	5.9	57	
				2	0.37	0.56	52	6.7	10.2	11.8	5.9	13.3	5.9	52	
		9	1.2	0.48	0.57	81	8.7	13.3	15.5	7.7	17.4	7.7	81		
			1.6	0.48	0.72	74	8.7	13.3	15.5	7.7	17.4	7.7	74		
		16	2	0.48	0.74	68	8.7	13.3	15.5	7.7	17.4	7.7	68		
			1.6	0.61	0.92	94	11.0	16.8	19.6	9.8	22.0	9.8	94		
		19	2	0.61	0.93	86	11.0	16.8	19.6	9.8	22.0	9.8	86		
			1.2	0.52	0.57	96	9.3	14.2	16.5	8.2	18.6	8.2	96		
		25	1.6	0.52	0.72	70	9.3	14.2	16.5	8.2	18.6	8.2	70		
			1.2	0.78	0.83	139	14.1	21.5	25.0	12.5	28.1	12.5	139		
			1.6	0.69	0.93	93	12.4	18.9	22.0	11.0	24.7	11.0	93		
			2	1.22	1.84	143	22.0	33.6	39.0	19.5	43.9	19.5	143		