

船舶運航のCO₂インベントリデータに関する研究

LCA研究グループ * 亀山道弘、平岡克英、木原 洸、千田哲也、
成瀬 健、福元正明、久津見都

1. まえがき

これまで船舶に関するライフ・サイクル・インベントリ分析（LCI 分析）は載貨重量 87,000(DWT)のタンカー（以後、「87 タンカー」と言う。）について実施され、CO₂ 排出量に関しては、運航段階が船舶のライフサイクル全体の約 98%を排出していることが示された。^[1]しかし、日本への原材料の輸入や製品の輸出に使用される船種や航路は多種多様であり、これらの運航条件が船舶輸送の LCI データにどの程度影響するかは明らかになっていない。そのため、大型タンカー、撤積船及びコンテナ船等代表的と考えられる船種の運航段階での CO₂ 排出量について、運航状況の実績^{[2][3]}に基づいてインベントリ分析を行い、船種等の運航条件の違いによる CO₂ 排出量への影響を明らかにする。

2. 対象船舶

2.1 対象船舶

解析の対象としたモデル船の主要目を表-1に示す。また、想定した航路を図-1に示す。ここでは、貨物の船積みをする港までの航海（往路）と荷揚げをする港への航海（復路）

に荷役作業を含めて1航海とした。なお、タンカーと撤積船の航路は出発港と目的港だけに寄港する単純な往復航路としたが、コンテナ船ではマレーシアを出航し、シンガポール、中国、香港を経由してロングビーチ（米国）に向かう北米航路とし、復路は台湾にも寄港することとした。

モデル船の航海条件を表-2に示す。260タンカー及び撤積船の航海条件は運航実績^[3]に基づいて設定した。87タンカーの就航条件が運航実績^[2]とは異なるため、主要目等から適切と考えられる航行条件を設定した。また、コンテナ船に船積み及び荷揚げされるコンテナ数は北米航路の実績値^[3]に基づき、平均の搭載数は約4670(TEUs)とした。停泊日数には仮泊は含めず、コンテナ船では荷役速度を約100(TEUs / hr)として算出した。

2.2 機関の運転条件

運航実績に基づいて設定した主機関、ディーゼル発電機及び補助ボイラーの運転条件を表-3に示す。機器の運転条件は定格出力の合計に対する負荷率（%）として表し、航海中又は荷役中は一定出力で稼働するものとした。なお、コンテナ船の機関の運転条件は欧州航路に基づく値とした。

3. 解析手法

3.1 システム境界

本解析の対象とする環境負荷項目をCO₂排出量とし、システム境界は主機関、ディーゼル発電機、補助ボイラーの運転及び燃料の生産等船舶の航行に直接関わるプロセスとした。港湾設備の使用、コンテナの製造や使用、船会社の営業活動及び燃料等の資材の輸送並びに廃棄物の処理等は含めなかった。



図-1 航路

3.2 プロセスフロー

船舶の運航の特性及び環境負荷項目の対象としたCO₂を考慮してプロセスフローを作成した。船舶運航のプロセスフローを図-2に示す。運航では船舶の主機関、発電機及びボイラーの運転による船舶航行と港湾での荷役作業及び定期的な保守・整備を含めた。

3.3 解析手法

インベントリ分析は作成した運航のプロセスフローに基づいて運航システムのプロセス行列を作成し、行列法^[4]により解析した。なお、計算処理には表計算ソフト(Microsoft Excel)を使用した。

4. 計算条件

4.1 運航計画

モデル船の使用期間は25年とし、2.5年に1度、保守・整備のためにドックに入渠するものとした。また、荷役作業の時間はタンカーではポンプ容量、コンテナ船ではコンテナの荷役速度及び撤積船は満載した貨物を24(hr)で荷役できる能力を仮定し、算出した。

船舶の航行及び荷役作業では主機関、ディーゼル発電機及び補助ボイラーの運転のみを考慮した。また、船舶の保守・整備では塗装と防食亜鉛板の交換のみを考慮し、船用品や機関部品等の交換及びドック排水等の作業に係わるエネルギーや資材の使用等は省略した。なお、使用する燃料は機関の種類に関わらず、全てバンカー油とした。

4.2 データの収集

運航段階において使用する燃料、塗料、電力等の素材やエネルギーの製造に関するインベントリデータは、各種データベース^{[5][6]}の解析結果や文献等のデータから比較・検討し、適切と考えられるデータを選択して使用した。また、防食亜鉛板等の部品製造に関するインベントリデータは製造工程の省略及び素材の簡略化を行った。

主機関、ディーゼル発電機及び補助ボイラーの運転に関するプロセスデータは出力等が相当する製品のカタログ等に基づき、燃料の

発熱量を考慮して作成した。

4.2 コンテナ重量

コンテナ1(TEU)の自重を1.85(ton)とし、一般的な輸送条件を考慮するため、1(TEU)当たりの貨物重量を、建造時の概略的な設計値の往路10(ton)と復路12(ton)とした。本解析の航海条件ではコンテナ船の載貨重量に対するコンテナ自重を含めた貨物搭載率(wt%)は往路で67(%)及び復路で79(%)となった。

5. 解析結果

5.1 船種の違い

インベントリ分析の実施により得られたモデル船の使用期間中の貨物輸送量、燃料消費量及びCO₂排出量を表-4に示す。また、モデル船の運航実績での燃料消費量の平均値及び解析結果との比較結果を表-5に示す。

単位輸送量当たりの燃料消費量の解析結果は撤積船を除き実績値より少なくなった。特に、コンテナ船では解析値に比べ実績での燃料消費量が約11(%)多くなった。しかし、欧州航路での貨物重量の実績値10.2(ton/TEU)を考慮すると燃料消費量の違いは約4(%)程度となる。また、タンカーではタンクヒーティングやタンク洗浄等の作業は解析では考慮されていない。船会社の経験では、実海域での航海の燃料消費量は主機関のカタログ上の燃料消費量に比べ、燃料の違いを考慮しても、約7(%)程度多くなるとも言われている。そのため、解析結果は実質的には一致する範囲にあると考えられる。

運航段階でのCO₂排出量は船種毎に違いが見られた。CO₂の排出量では使用期間及び単位輸送量当たりともコンテナ船が最大となり、単位輸送量当たりで最も排出量の少ない260タンカーの約4.6倍となった。また、260タンカーのCO₂排出量は87タンカーに比べ、輸送量当たりで約53(%)少ない排出量となった。

5.2 CO₂を排出するプロセス

モデル船毎にCO₂を排出するプロセスの内訳を図-3～6に示す。CO₂を排出する主なプロセスは主機関、補助ボイラー及びディーゼル

発電機の運転並びに燃料の生産であった。主機関の運転によるCO2排出量は全排出量の80（％）以上を占め、最もCO2を排出するプロセスであった。ディーゼル発電機がCO2排出量全体に占める割合では、コンテナ船の割合が高く、撤積船の割合が低くなった。コンテナ船では冷凍コンテナの搭載に伴う電力消費量の増大、また、撤積船では主機の駆動に附随して稼動する軸発電機とターボ発電機を持つためと考えられる。なお、燃料の生産に伴うCO2排出量が運航全体での排出量の約7％程度を占めた。

6. 課題

船舶輸送の運航段階でのインベントリデータを的確に作成するために必要な事項は以下のとおりである。なお、解析結果の有意性の考慮や設定条件の精度等詳細な条件の設定には、更に感度解析や不確実性解析の実施が必要である。

6.1 設定条件

本解析で的確な入力データを必要とする項目を以下に示す。

- (1) 実海域の就航航路での貨物の積載率、航海速度及び主機関出力の関係
- (2) 荷役速度と停泊時間
- (3) ボイラー、ディーゼル発電機の負荷率

6.2 CO2 排出に関わるプロセス

6.1 の項目に加え、CO2 排出に関わるプロセスを以下に示す。

- (1) 貨物油や燃料のヒーティング、タンク洗浄及び冷凍コンテナ等貨物の維持・管理
- (2) スラッジ等の可燃物の焼却
- (3) 船体清掃等の船体の保守・修繕作業
- (4) 船用品や機関部品等の交換・整備作業
- (5) コンテナや港湾等の荷役設備の使用

6.3 関連データの整備

船舶運航のインベントリ分析を実施するためには、以下のデータの整備が必要である。

- (1) 船舶運航に関わる燃料、潤滑油、塗料等の素材及び船用品や機関部品の製造に関するインベントリデータ
- (2) 船舶の主機関、発電機、ボイラー機関の運転に関するプロセスデータ
- (3) 焼却炉等の排出物・廃棄物処理に関わるプロセスデータ

7. まとめ

船舶の運航段階でのCO2排出に関するプロセスツリーと運航実績に基づいて、代表的と考えられる船種を対象にインベントリ分析を実施した。本解析の実施により各種船舶の貨物の輸送量（ton-km）当たりの概括的なCO2排出量とその内訳を明らかにした。また、船

表-4 モデル船の運航ステージでの CO2-LCI 分析の結果

項 目		船 種			
		87 タンカー	260 タンカー	140 撤積船	6100 コンテナ船
貨物輸送量(25年)(ton-km)		$2.1 \times 10 (+11)$	$6.6 \times 10 (+11)$	$2.6 \times 10 (+11)$	$3.3 \times 10 (+11)$
1 航海での燃料消費量(ton)		$1.9 \times 10 (+3)$	$2.7 \times 10 (+3)$	$1.3 \times 10 (+3)$	$6.4 \times 10 (+3)$
燃料消費量(g/ton-km)		1.85	0.866	1.15	3.98
CO2 排出量 (ton-CO2)	使用期間(25年)	$1.3 \times 10 (+6)$	$1.8 \times 10 (+6)$	$1.0 \times 10 (+6)$	$4.4 \times 10 (+6)$
	単位輸送量	$6.2 \times 10 (-6)$	$2.9 \times 10 (-6)$	$3.9 \times 10 (-6)$	$1.34 \times 10 (-5)$

表-5 モデル船の運航実績での燃料消費量と解析結果との比較

項 目	87 タンカー	260 タンカー	140 撤積船	6100 コンテナ
燃料消費量 (g/ton-km)	1.98 1	0.914	1.14	4.45 2
解析値との比較	+7(%)	+6(%)	-1(%)	+11(%)

1 貨物の積載率 75(%)相当の値

2 欧州航路での平均値

船舶輸送の運航段階でのインベントリ分析の実施における課題を明らかにした。

8. 謝辞

本研究の一部は（財）日本船舶標準協会との共同研究として実施した。また、海上技術安全研究所に設置された「船舶LCA研究委員会」委員の方々には懇切な御指導、御助言を頂いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

[1] 亀山道弘 他：船舶からのCO₂排出に関するライフ・サイクル・インベントリ分析、第4回エコバランス国際会議、p517～520

[2] 平岡克英 他：船舶の運航に関するインベントリ分析、第74回船舶技術研究所研究発表会（2000年6月）講演集、p335～340

[3] （財）日本船舶標準協会、平成12年度ライフサイクルアセスメント(LCA)応用施策に関する検討調査報告書、平成13年3月、p8～20

[4] R.Heijungs, etc.: Environmental Life Cycle Assessment of products Backgrounds- October 1992、p53～55

[5] Pre consultants B.V., Simapro LCA software (Ver.4.0)

[6] 資源環境技術研究所, NIRE-LCA software (Ver.2)

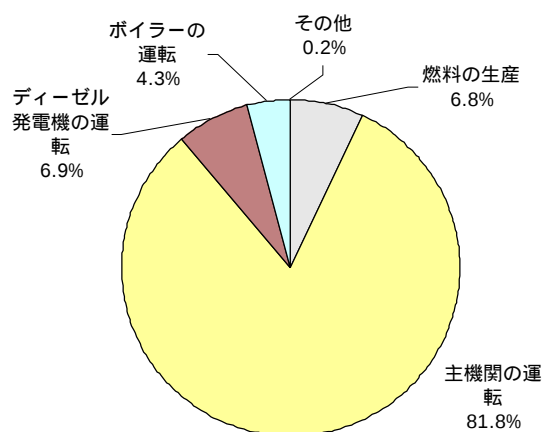


図-3 87タンカーのCO₂排出の内訳
25年間の総排出量 1.3 (Mton-CO₂)

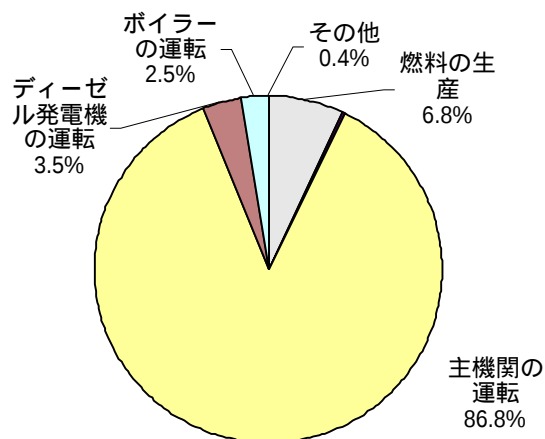


図-4. 260タンカーのCO₂排出の内訳
25年間の総排出量 1.8 (百万トン-CO₂)

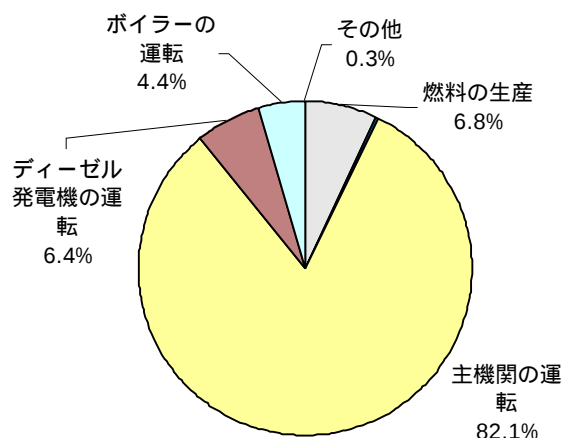


図-5 140撤積船のCO₂排出の内訳
25年間運航の総排出量 1.0 (Mton-CO₂)

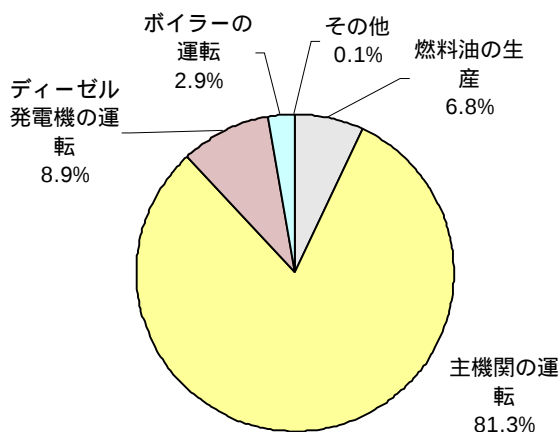


図-6. 6100コンテナ船のCO₂排出の内訳
25年間運航での総排出量 4.4 (Mton-CO₂)

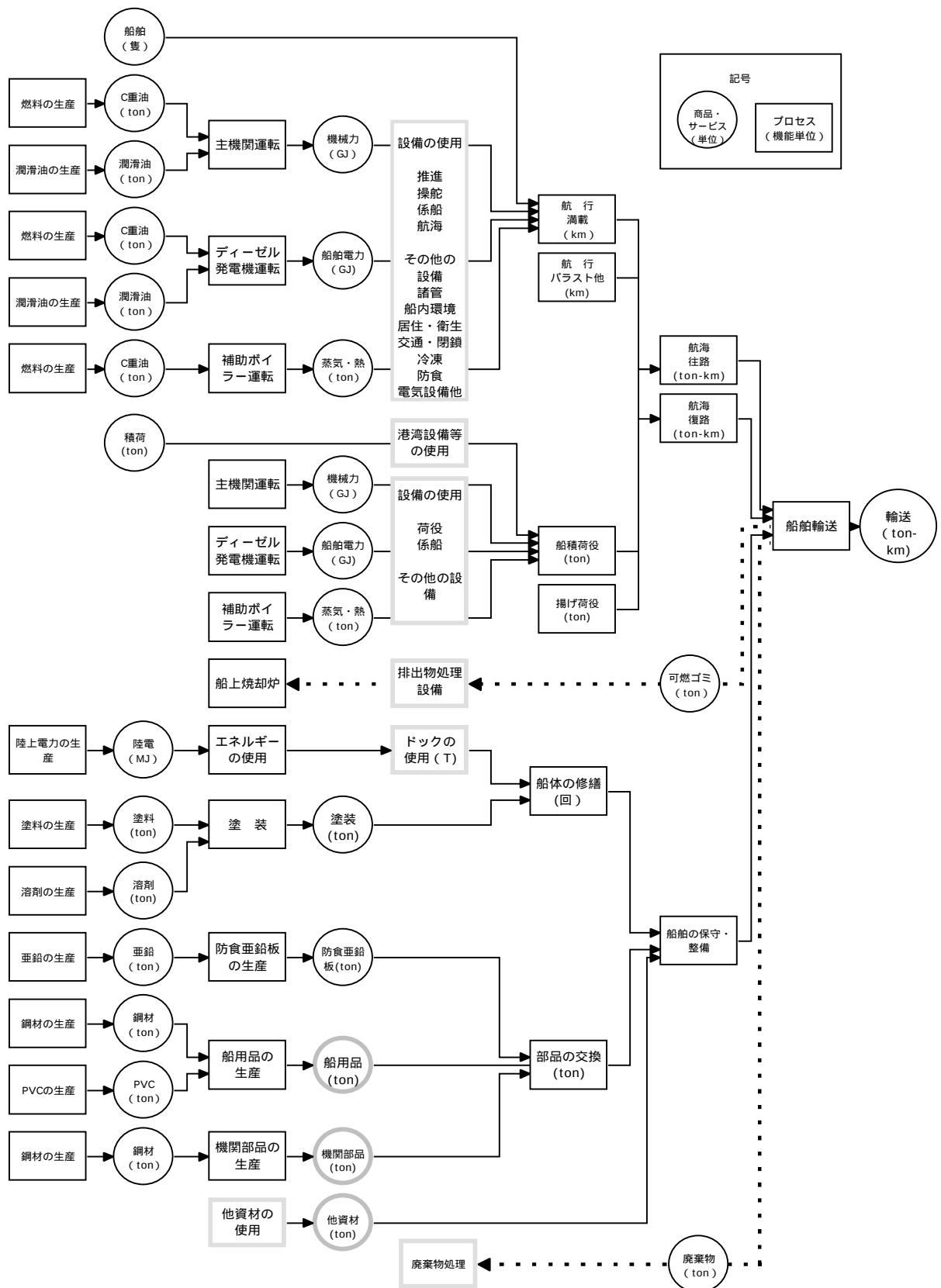


図-2 船舶運航のプロセスフロー

表 - 1 モデル船の主要目

項 目	単位	船 種			
		87 タンカー	260 タンカー	140 撤積船	6100 コンテナ船
貨物の種類		原油	原油	石炭	コンテナ
載貨重量等	ton	87,000	260,000	140,000	6,100 (TEU)
満載航海速力	kt	15.0	15.0	13.7	23.0
乗員	人	49	46	25	30
主機関の種類	—	2St.ディーゼル	2St.ディーゼル	2St.ディーゼル	2St.ディーゼル
主機関出力(MCR)	kW	11,500	21,800	12,100	53,000
補助ボイラー	t/h	30	85	1.5	13
ディーゼル発電機	kW	750(kW) × 3	740(kW) × 3	680(kW) × 3	2100(kW) × 4
主貨油ポンプ	m ³ /h	2500(m ³ /h) × 3	5500(m ³ /h) × 3	/	/
建造年(起工)	西暦	1985 年	1989 年	1989 年	1997 年

表 - 2 航海条件

項 目		船 種			
		87 タンカー	260 タンカー	140 撤積船	6100 コンテナ
想定した航路		日本-中東	日本-中東	日本-豪州	北米航路
1.往路	距離(海里)	6,583	6,583	4,358	8,202
	速力(kt)	15	15	14	23
	貨物搭載率(%)	0	0	0	76(%TEU)
	船積日数(日)	2.4	3.4	6.0	7.4
2.復路	距離(海里)	6,583	6,583	4,358	8,559
	速力(kt)	14	13	13	23
	貨物搭載率(%)	98	98	96	77(%TEU)
	荷揚日数(日)	2.8	3.8	5.6	5.8

(注) コンテナ船以外の貨物搭載率は載貨重量(DWT)に対する貨物の重量(%)

表-3 各機関の航海時の運転条件(定格出力に対する出力%)

機関の種類	航海状態		船 種			
			87 タンカー	260 タンカー	140 バルカー	6100 コンテナ
主機関	航海	満載/復路	85 %	75 %	80 %	80 %
		バラスト/往路	85 %	75 %	80 %	80 %
	荷役	船積	0 %	0 %	0 %	0 %
		荷揚	0 %	0 %	0 %	0 %
ディーゼル 発電機	航海	満載/復路	30 %	7 %	30 %	20 %
		バラスト/往路	30 %	9 %	30 %	20 %
	荷役	船積	30 %	70 %	30 %	70 %
		荷揚	30 %	100 %	30 %	70 %
ボイラー	航海	満載/復路	0 %	0 %	75 %	1.5 %
		バラスト/往路	0 %	0 %	75 %	1.5 %
	荷役	船積	0 %	5 %	75 %	70 %
		荷揚	100 %	25 %	75 %	70 %

(注) 主機関の定格出力は連続最大出力(MCR)とした。