

船舶の運航のインベントリ分析と感度分析の適用

環境・エネルギー研究領域 環境影響評価研究グループ * 亀山道弘、平岡克英

まえがき

インベントリ分析の結果として得られた環境負荷の改善を行うためには、プロセス自体に加え、プロセスに含まれる各項目が環境負荷にどの程度影響しているかを把握することが必要である。プロセスの影響の度合いを図る簡易的な方法としては、インベントリ分析等の解析を実施した後に、着目する項目を数%変化させて再度計算を行うことである。しかし、船舶のライフサイクルのように数万の部品や多種多様なプロセスを伴う場合、プロセスの全ての項目について、このような計算を行うことは多大な手間と時間を要する。そのため、酒井は感度分析に摂動法を適用することで、多数のプロセスからなるシステムの感度分析を行列表法により簡潔に実施できることを示した。¹⁾

本研究では、船舶への感度分析の適用手法を紹介すると共に、運航モデルに関する感度分析の実施を通じて、CO₂及びNO_xの排出量を低減する最も効果的なプロセスの項目を明らかにする。

1. 感度の定義

プロセスの項目が環境負荷等の応答値へ与える影響の大きさを図る感度として、以下の2つの定義を考慮した。

$$\text{物理的感度: } \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} \quad (1)$$

$$\text{変動率感度: } \frac{\Delta\beta/\beta}{\Delta\alpha/\alpha} \quad (2)$$

ここで、 α :入力量、 β :応答量、 Δ :各量の変動量である。

物理的感度(physical sensitivity)は項目の変化量が応答値にもたらす影響の量を絶対値で示し、次元を持つ。また、変動率感度(rate sensitivity)は変動率の比であり、項目の比較を行うことができる無次元量である。なお、(2)式の変動率感度は、酒井により仮に命名された用語である。

船舶の建造、運航、解体及びリサイクルのライフサイクルに関わるプロセスとその項目数は膨大である。プロセスを改良し、システム全体での環境負荷を効果的に改善するためには、改善すべき優先度の高いプロセスの項目を定量的に見い出すことが重要である。感度として変動率感度を用いることで、項目間での相対的な比較を直接行うことができ、最も影響の大きい項目を客観的に選定することが可能となる。そのため、本解析における感度分析の感度には、変動率感度を用いることとした。

2. 定式化

変動率感度による感度分析の定式化は酒井により行われた¹⁾。ここでは本研究で用いた変動率感度による感度分析の解析手法をインベントリ分析と併せて紹介する。

2.1 システムの行列表現

インベントリ分析における行列表法ではプロセスは列ベクトルで表現し、行は製品やサービス又は物質の流れを示す。 r 個のプロセスから成るシステムは(3)式のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{ir} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mj} & \cdots & a_{mr} \\ b_{11} & \cdots & b_{1j} & \cdots & b_{1r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{k1} & \cdots & b_{kj} & \cdots & b_{kr} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nj} & \cdots & b_{nr} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $A(m, r)$ は経済上の入出力項目数 m 、また、 $B(n, r)$ は環境からの入力又は環境への出力に

関わる項目数 n の行列である。ただし、入力を (-)、出力を (+) とし、 a_{ij} は j 番目のプロセスの i 番目の経済上の入出力項目、また、 b_{kj} は k 番目の環境負荷項目の入出力量を示す。

2.2 平衡式

複数のプロセスからなるシステム全体は 1 つのプロセス(システム)とみなすことができるので、(4)式のように 1 つの列ベクトルとして表現する。

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $P(m)=(p_1, \dots, p_m)$ の列ベクトルで、システム全体の経済上の入出力項目を示し、また、 $Q(n)=(q_1, \dots, q_n)$ の列ベクトルで、環境負荷項目を示す。

製品やサービス等を示す各行において、システム全体で物質質量で平衡式が成り立ち考えられるので、以下の(5)式が成り立つ。ただし、 $X(m)$ は未知のプロセス量の列ベクトルである。

$$AX = P \quad (5)$$

また、環境負荷項目においても同様に平衡式が成り立つと考えられ、以下の(6)式が成り立つ。

$$BX = Q \quad (6)$$

インベントリ分析では、(5)式の連立方程式を逆行列 A^{-1} により、未知のプロセス量行列 X を求める。更に、求めたプロセス量行列 X を用いて(6)式より環境負荷項目の列ベクトル Q を求める。

2.3 変動率感度

変動率感度に着目し、(2)式で定義された変動率感度を定義すると(7)式となる。

$$s_{ij} = \frac{\Delta Q_k / Q_k}{\Delta a_{ij} / a_{ij}} \quad (7)$$

ここで、 s_{ij} の値は、 a_{ij} の変動率に対する環境負荷の総量の変動率を示している。また、 Q_k は環境負荷項目に関する列ベクトル Q における k 番目の環境負荷の総量を示す。

酒井は摂動法を適用して変動率感度を誘導し、以下の(8)～(11)を導いている。

$$s_{ij} = \frac{\Delta Q_k / Q_k}{\Delta a_{ij} / a_{ij}} = -\frac{a_{ij}}{Q_k} BA^{-1} A_{ij}^T X^0 \quad (8)$$

ここで、 A_{ij}^T は第 ij 要素のみ 1 で他の要素が 0 である行列である。また、 X^0 は(5)式の連立方程式の解である。また、(8)式を更に変形し、 s_{ij} を要素とする感度行列 $S(m, r)$ が(9)式として誘導される。

$$S = E^T X^{0T} \otimes A \quad (9)$$

$$\text{ここで、} E = -\frac{1}{L} BA^{-1} \quad (10)$$

なお、 $\otimes$ は(11)式で定義される行列の演算子であり、 x 行列及び y 行列の ij 要素同士の積を意味する。

$$[z_{ij}] = [x_{ij}] \otimes [y_{ij}] \quad z_{ij} = x_{ij} \otimes y_{ij} \quad (11)$$

従って、全要素の環境負荷項目に対する感度が行列演算の結果として求めることができる。

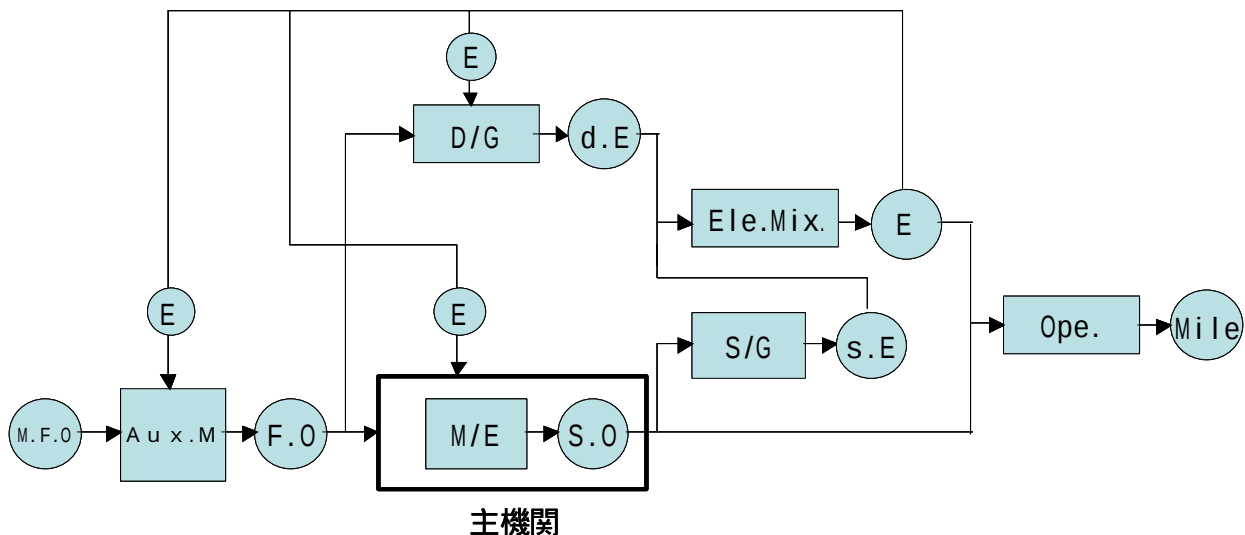
3. 試解析

船舶の運航を簡略化したモデルを対象に感度分析を行った。以下にその実施方法を示す。

3.1 解析モデル

解析対象とした船舶の航行に関するプロセスフローを 6 つのプロセスに簡略化した。解析モデルとした航海のプロセスフローを図 - 1 に示す。

モデル船は主機軸力 (S.O) と電力 (E) を消費して航行 (Ope.) する。主機軸力は主機関 (M/E) また、電力はディーゼル発電機 (D/G) と軸発電機 (S/G) の運転により得る。なお、ボイラー及び排



図－１ 船舶運航のプロセスフロー（モデル解析用）

気エコノマイザーにより発生する蒸気は省略した。

ディーゼル発電機と軸発電機が発電した電力は仮定の電力調整装置（Ele.Mix.）により電力として統合され、航行、補機（Aux.M）及び主機関やディーゼル発電機の機器で消費される。また、船積みした船舶燃料（M.F.O.）は油清浄機等の補機類により処理され、ディーゼル発電機と主機関に供給される。なお、船舶燃料は解析モデルの範囲外から与えられるものとし、製造に伴う環境負荷は省略した。

3.2 解析条件

解析の目的は二酸化炭素（CO₂）及び窒素酸化物（NO_x）の排出量とした。想定したモデル船の船種はバラ積み貨物船（バルカー）とし、その主要目を表 - 1 に示す。なお、モデル船は軸発電機を装備していない。実船への適用とモデル解析の理解を深めるために仮に設定した。

解析モデルに使用したプロセスの種類と設定し

た条件を表 - 2 に、また、各プロセスの機能単位とプロセスデータを表 - 3 に示す。主機関及びディーゼル発電機の運転に伴う CO₂ 排出量は燃料消費量(t)に比例し、NO_x 排出量は機関出力（MJ）に比例させた。²⁾

航海に必要な主機軸力と電力は実船の設計段階での負荷率に基づいて設定した。各プロセスに含まれる機器の種類はプロセスの機能を考慮して振り分けた。設定した電力消費量の負荷率を表 - 4 に示す。また、作成した解析モデルのプロセス行列を表 - 5 に示す。

表 - 1 モデル船の主要目

船種	バルカー
航海速力(knot)	14.5
最大搭載重量(dwt)	76,000
主機関出力(MCR)(kW)	8,550
ディーゼル発電機(kW)	600×3 台
補助ボイラー(t/hr)	1.3

表 - 2 プロセスの解析条件

プロセス名	解析条件
航行	機関軸出力を主機関の連続最大出力（MCR）の 90%とした。
電力調整	発電量の構成をディーゼル発電機 95%、軸発電機 5%とした。
軸発電機の運転	発電効率は機関軸出力からの入力 90%とした。
主機関の運転	機関出力 8,550kW（MCR）、燃費 171g/kWh とした。
ディーゼル発電機の運転	原動機出力 660kW、燃費 194g/kWh とした。
補機の運転	廃油発生量を燃料処理量の 1%とした。

表 - 3 プロセスデータ

プロセス名	単位	電力消費量 kW	燃料消費量 g/MJ	CO2 排出量 g-CO2/MJ	NOx 排出量 g-NOx/MJ
航行	nm	200	0	0	0
電力調整	MJ	0	0	0	0
軸発電機の運転	MJ	0	0	0	0
主機関の運転	MJ	67	49.5	154	4.7
ディーゼル発電機の運転	MJ	7	56.1	175	3.6
補機の運転	t	14	0	0	0

注) 燃料消費量はバンカー油(9,800kcal/kg)相当。

表 - 4 機器類の分類と電力負荷率 (航行時 76 バルカー)

機器の名称	負荷率	備考	機器の名称	負荷率	備考
A 航行 (Ope.)			A 航行 (Ope.)		
1 一般供給用空気圧縮機	85		22 操舵機 No.1	25	
2 主冷却清水ポンプ	85		23 居住区 ライト	60	
3 主冷却海水ポンプ	85		24 機械室 ライト	90	
4 清水ポンプ	70		25 航海灯	100	
5 飲料水ポンプ	80		26 通信装置	70	
6 温水循環ポンプ	80		B 主機関(M/E)		
7 生物付着防止装置	80		1 主潤滑油ポンプ	80	
8 給水ポンプ	70		2 加圧潤滑油加圧ポンプ	60	
9 造水装置エジェクターポンプ	75		C ディーゼル発電機(D/G)		
10 造水機ポンプ	75		1 燃料供給ポンプ	70	
11 エンジン制御室ユニットクーラ	80		2 燃料循環ポンプ	70	
12 機関室ファン(供給) No.1	85		3 No.1 L.O フライミング ポンプ	60	
13 機関室ファン(供給) No.2	85		4 No.2 L.O フライミング ポンプ	60	
14 機関室ファン(排出)	85		D 補機 (Aux.M)		
15 油清浄機 排気ファン	85		1 H.F.O 移送ポンプ	70	
16 エアコン ファン	80		2 ビルジポンプ	60	
17 居住区 ファン	85		3 燃料清浄機	80	
18 空気調和装置	80		4 潤滑油清浄機 No.1	70	
19 ギャレー、その他	60		5 潤滑油清浄機 No.2	70	
20 電子レンジ	80		6 清浄機潤滑油供給ポンプ No.1	70	
21 食料冷蔵庫	80		7 清浄機潤滑油供給ポンプ No.2	70	

備考 断続使用の機器

機器の負荷率は定格値に対する%

表 - 5 プロセス行列

	補機	主機関	軸発電機	ディーゼル 発電機	電力調整	航行
処理済み燃料 F.O. (t)	1	-4.95E-02	0	-5.61E-02	0	0
機関軸出力 S.O (GJ)	0	1	-1.11E+00	0	0	-1.91E+00
軸発電機電力 s/E (GJ)	0	0	1	0	-5.00E-02	0
ディーゼル発電電力 d/E (GJ)	0	0	0	1	-9.50E-01	0
電力 E (GJ)	-1.89E-02	-8.71E-03	0	-1.17E-02	1	-4.97E-02
航海距離 (nm)	0	0	0	0	0	1

3.3 解析結果

インベントリ分析の結果を表—6に示す。船舶が1海里(1,852m)航行するために、船舶燃料(M.F.O.)を99.4kg消費し、CO₂を306kg、また、NO_xを約9kg排出する。各プロセスの作業量を表—7に示す。航行距離1海里当たり、機関軸出力(S.O.)1.91GJと電力(E)0.069GJを必要とする。

図—1の航行モデルにおいて、総発電量を一定とし、ディーゼル発電機と軸発電機の発電量の比率を各々100%とした場合のNO_xの排出量への影響を表—8に示す。ただし、主機関の負荷率は変動させた。発電量の比率を変化させても燃料消費量やCO₂に大きな変化はない。軸発電機のみで発電した場合、主機関出力の負荷が増大し、その影響でNO_xの排出量は若干増加する。また、ディーゼル発電機のみを使用した場合、発電機の負荷率は定格出力の46%の負荷率となった。

CO₂及びNO_xの排出量に関して、(9)式より求めた運航モデルの変動率感度の感度係数行列を表—9及び表—10に示す。

4. 感度係数行列

解析モデルに関する変動率感度に基づく感度係数行列の特徴を以下にまとめる。

(1) 感度係数

感度係数行列の各項目の絶対値は、環境負荷の最大変化率を表している。絶対値の最大値は1であり。表—9及び表—10では、対角行列の航行の値が「-1」であり、このプロセスの効率を改善すれば、CO₂排出量を100%削減できることを意味する。また、機関軸出力の投入量を限りなく「0」に近づければ、97.1%のCO₂を削減できることを意味している。

(2) 対角行列成分

プロセス行列(表—5)の対角行列(I行I列)はプロセスの生産効率を意味する。つまり、プロセスの生産効率が増大すれば、環境負荷は減少する。従って、解析モデルの感度係数行列の対角行列の値は、負の値となる。

(3) 非対角行列成分

プロセス行列の対角行列以外の項目(I行J

表 - 6 環境負荷量

環境負荷項目	数量	単位
船舶燃料 (M.F.O.)	9.94E-02	t
CO ₂	3.06E-01	t
NO _x	9.23E-03	t

ただし、数量の(－)は入力、(＋)は出力を意味する。

表 - 7 プロセス量行列

プロセス項目	数量	単位
処理済み燃料 (F.O.)	9.84E-02	t
機関軸出力 (S.O.)	1.91E+00	GJ
軸発電機電力 (s/E)	3.45E-03	GJ
ディーゼル発電電力 (d/E)	6.55E-02	GJ
電力 (E)	6.90E-02	GJ
航海距離	1.00E+00	nm

表 - 8 ディーゼル発電機と軸発電機の発電比率の変化による影響

発電量	D/G	0%	95%	100%
	S/G	100%	5%	0%
燃料消費量 (MFO)	(kg/nm)	99.3	99.4	99.4
CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /nm)		306	306	306
NO _x 排出量(kg-NO _x /nm)		9.34	9.23	9.23
主機関負荷率(%MCR)		93.7%	89.9%	89.9%
S/G による M/E の負担率 (MCR%)		3.6%	0.2%	0%
D/G 負荷率(%600kW)		0%	44%	46%

列、I≠J)のうち、製品やサービスが投入されたプロセスの感度係数行列の項目は正の値となる。つまり、消費量が増大すれば、環境負荷は増大する。また、製品等の投入がない項目の感度係数は「0」となる。

(4) プロセス(列成分)

感度分析の対象となる環境負荷項目を排出しないプロセスでは、その感度係数の列成分の総和は「0」となる。また、主機関やディーゼル発電機のように感度分析の対象となる環境負荷項目がある場合では、その総和は「0」とはならない。

(5) 製品・サービス(行成分)

機関軸出力や電力等、対象となるプロセス

表 - 9 感度係数行列 (CO₂)

	補機	主機関	軸発電機	ディーゼル 発電機	電力調整装 置	航行
処理済み燃料 tF.O.	-1.08E-03	1.04E-03	0	4.02E-05	0	0
機関軸出力 S.O	0	-9.73E-01	1.95E-03	0	0	9.71E-01
軸発電機電力 s/E	0	0	-1.95E-03	0	1.95E-03	0
ディーゼル発電電力 d/E	0	0	0	-3.79E-02	3.79E-02	0
電力 E	1.08E-03	9.64E-03	0	4.43E-04	-3.99E-02	2.87E-02
航海距離	0	0	0	0	0	-1.00E+00

表 - 10 感度係数行列 (NO_x)

	補機	主機関	軸発電機	ディーゼル 発電機	電力調整装 置	航行
処理済み燃料 F.O.	-7.51E-04	7.23E-04	0	2.81E-05	0	0
機関軸出力 S.O	0	-9.82E-01	1.96E-03	0	0	9.80E-01
軸発電機電力 s/E	0	0	-1.96E-03	0	1.96E-03	0
ディーゼル発電電力 d/E	0	0	0	-2.59E-02	2.59E-02	0
電力 E	7.51E-04	6.73E-03	0	3.10E-04	-2.79E-02	2.01E-02
航海距離	0	0	0	0	0	-1.00E+00

の製品やサービスの感度係数の総和は「0」となる。ただし、本解析の航行距離のように対象となるシステム全体の機能の項目については、「0」とはならない。

5. 解釈

モデル船の航行に関する感度分析の結果からCO₂及びNO_xの排出量への影響に関して以下のことが明らかになった。

- (1) 船舶航行及び主機関運転の効率改善が環境負荷を低減する最も有効な方法である。
- (2) ディーゼル発電機と軸発電機等の発電量の構成によりCO₂で約4%、また、NO_xで約3%程度の範囲で排出量が変化する。
- (3) ディーゼル発電機の運転に伴うCO₂及びNO_xの排出に関わる影響は2~4%程度であった。
- (4) 航行プロセスに分類した機器の電力消費量に伴うCO₂及びNO_xの排出への影響は、2%程度となった。
- (5) 表—9及び表—10に示されるCO₂とNO_xに関する感度係数行列はよく似ている。これは、CO₂とNO_xが主機関とディーゼル発電機の運転だけで排出されているためである。

6. まとめ

摂動法による感度分析を船舶に適用する手法を示し、簡略化した船舶の運航モデルに対して感度分析を行った。感度分析の適用により環境負荷へ影響を与えるプロセスの影響を入出力の項目単位で定量的に求めることができた。

また、感度分析を行うことで、収集すべきプロセスデータの精度を考慮することができ、データ収集を効率的に実施することができる。

参考文献

- 1) 酒井信介、機械製品への環境負荷評価への感度解析技術の応用(1)(2) MLCA 部会 第2回ワークショップ資料「LCAを支える手法論(II)」p10~21、2001年5月18日、(社) 未踏科学技術協会 エコマテリアル研究会
- 2) Lloyd's Register of Shipping, Marine Exhaust Emissions Research Program, 1995