

産業連関表による船舶のインベントリ分析と感度分析

環境・エネルギー研究領域 環境影響評価研究GR * 福元正明、亀山道弘、平岡克英

1. まえがき

平成7年(1995年)産業連関表と独立行政法人国立環境研究所提供の環境負荷原単位データブック(略称 3EID)を用いて、取引基本表の任意部門における排出物のインベントリ分析と感度分析のための一連のソフトウェアツールを作成した。そのツールを用いて、造船4部門(鋼船、その他の船舶、船用内燃機関、船舶修理)と水運3部門(外洋輸送、沿海・内水面輸送、港湾運送)の、CO₂、NO_x、SO_x、SPM(浮遊粒子状物質)の排出に関する分析を行った。

本稿では、紙面の都合もあるので、「鋼船」と「沿海・内水面輸送」の二つの部門のNO_xに関するインベントリ分析と感度分析について報告する。また、船舶7部門全体にわたってのインベントリ分析結果の概要を説明するとともに、国際的取引がからむ「外洋輸送」のインベントリ分析の問題点に言及する。

以降、「沿海・内水面輸送」は「内航輸送」と略す。

2. インベントリ分析と感度分析の方法

(1) 平成7年産業連関表の取引基本表は行519部門×列403部門で構成されているが、3EIDに準拠して一部の行と列を統合し、行399部門×列399部門に正方行列化した。この際、造船4部門と水運3部門のいずれも統合前と変わっていない。この正方行列から作成される投入係数行列をAとする。

(2) [生産額ベースのインベントリ分析] 輸入される財・サービスもすべて国内で生産されるという前提で、1単位の需要増によって連鎖的に誘発される生産の合計を次の式で求める。

$$I + A + A^2 + A^3 + \cdots = (I - A)^{-1} \quad \text{式}$$

部門jに1単位の需要が生じた場合、それに誘発されて部門iで生産される単位の数は $(I - A)^{-1}$ の行i列成分の値に等しい。

(3) [排出物に関するインベントリ分析] 部門jの1

単位(100万円)の生産のために部門jから直接排出される量を e_j とする(以降、これを単位直接排出量という)。部門jの1単位(100万円)の需要の発生によって、自部門及び関連部門で連鎖的に誘発される排出量の合計を ε_j とする(以降、これを部門jの排出原単位という)。輸入品が輸入される以前に国外で生産されたときの排出量は、同一製品を国内で生産する場合のそれと同一であるものとする。次の式が成立する。

$$\varepsilon_j = e_j + \sum_i^n \varepsilon_i a_{ij} \quad \text{即ち} \quad \varepsilon = e^T (I - A)^{-1} \quad \text{式}$$

ここで、 ε は $\varepsilon_j (j=1,2,\dots,n)$ を成分とするベクトル、

e は $e_j (j=1,2,\dots,n)$ を成分とするベクトルを表す。

(4) [感度分析] 次の二つの変動率感度を用いる。

i部門の単位直接排出量(e_i)の変動率に対する対象

部門kの排出原単位(ε_k)の変動率の比

$$S_i^k = \lim_{\Delta e_i \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{\varepsilon_k} \right)}{\left(\frac{\Delta e_i}{e_i} \right)} \quad \text{式}$$

i→j部門の投入係数(a_{ij})の変動率に対する対象部

門kの排出原単位(ε_k)の変動率の比

$$S_{ij}^k = \lim_{\Delta a_{ij} \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{\varepsilon_k} \right)}{\left(\frac{\Delta a_{ij}}{a_{ij}} \right)} \quad \text{式}$$

この2つの変動率感度を計算するための数式は文献3)より引用しているが、その数式の説明は割愛する。式の誘導の方法も含めて文献3)を参照願いたい。

以上の分析のデータソースとして、Aは産業連関表の基本取引表を、eは3EIDを用いている。

3. NO_x 排出の概況

表1は、32部門(大分類)の部門毎の平成7年の国内生産額、1年間の直接NO_x排出量、及び単位直接NO_x排出量を表したものである。表中の単位直接NO_x排出量は、式 の e_j に相当する。この表で運輸部門に属する水運3部門と輸送機械に属する造船4部門について表したものが表2である。

表1 32部門(大分類)の生産額とNO_x排出量

順位	部門(大分類)	国内生産額		直接NO _x 排出量		単位直接NO _x 排出量 Kg/100万円
		兆円	(%)	万トン	(%)	
1	運輸	50.1	5.3	212.3	62.1	42.37
2	電力・ガス・熱供給	18.8	2.0	25.8	7.5	13.71
3	農林水産業	15.8	1.7	22.2	6.5	14.05
4	窯業・土石製品	9.7	1.0	17.3	5.1	17.85
5	建設	88.1	9.4	13.9	4.1	1.57
6	鉄鋼	20.1	2.1	8.9	2.6	4.45
7	化学製品	25.8	2.8	7.0	2.0	2.71
8	石油石炭製品	10.5	1.1	5.4	1.6	5.15
...	...					
21	輸送機械	41.9	4.5	1.0	0.3	0.23
...	...					
	(合計)	937	100	342	100	

表2 船舶7部門の生産額とNO_x排出量

順位	部門	国内生産額		直接NO _x 排出量		単位直接NO _x 排出量 Kg/100万円
		兆円	(%)	万トン	(%)	
1	外洋輸送	1.802	0.19	110.92	32.434	615.5
4	内航輸送	1.308	0.14	22.79	6.665	174.2
20	港湾運送	1.452	0.15	2.07	0.607	14.3
269	鋼船	1.292	0.14	0.0224	0.0065	0.173
268	その他の船舶	0.080	0.01	0.0037	0.0011	0.467
372	船用内燃機関	0.503	0.05	0.0226	0.0066	0.448
370	船舶修理	0.306	0.03	0.0038	0.0011	0.125
	(合計)	937.1	100	341.99	100	

全産業部門から排出されるNO_x量の62.1%を運輸部門が占め、その運輸部門に属する「外洋」だけで全産業の32.4%、「内航」だけで6.7%を占めた。これらの部門では国内生産額よりもNO_x排出量の割合(%)の方が2ケタ大きい。他方、造船4部門では国

内生産額よりもNO_x排出量の割合(%)の方が1ケタ小さい。各産業部門の単位直接NO_x排出量も、水運3部門は極めて多いが、造船4部門は極めて少ない。

4. 分析結果(インベントリ分析)

表3は産業連関表投入表の「鋼船」に関する部分の一部である。国内生産額1兆2,920億円の生産を行うために、「船用内燃機関」から1,987億円、「熱間圧延鋼材」から972億円、と続いて全体では合計8,997億円の財・サービスを投入された。

投入係数で見ると、「鋼船」を1単位生産するために、「船用内燃機関」から0.154単位、「熱間圧延鋼材」から0.075単位、と続いて全体では合計0.696単位の財・サービスが投入される。

表3 鋼船の投入額と投入係数(上位10)

順位	投入元の部門	投入額 (100万円)	投入係数
1	船用内燃機関	198,669	0.154
2	熱間圧延鋼材	97,243	0.075
3	卸売	87,900	0.068
4	金融	42,931	0.033
5	鉄鋼シャースリット業	42,512	0.033
6	ポンプ及び圧縮機	25,296	0.020
7	物品賃貸業(除貸自動車)	23,397	0.018
8	運搬機械	20,497	0.016
9	その他の金属製品	19,638	0.015
10	回転電気機械	18,592	0.014
...	...		
	(合計)	899,705	0.696

表4 鋼船の生産額ベースのインベントリ

順位	波及先の部門	生産額 (単位)
1	鋼船	1.000
2	船用内燃機関	0.192
3	卸売	0.123
4	熱間圧延鋼材	0.115
5	金融	0.086
6	粗鋼(転炉)	0.050
7	鉄鋼シャースリット業	0.043
8	事業用電力	0.041
9	物品賃貸業(除貸自動車)	0.038
10	冷間仕上鋼材	0.032
...	...	
	(合計)	2.594

表4に、式 によって推計した「鋼船」の生産額ベースのインベントリを示す。「鋼船」の1単位の需要増加に伴って、自部門に1.000単位、「船用内

燃機関」に 0.192 単位、と続いて全体では合計 2.594 単位の生産が誘発される。

表 5 に、式 によって推計した「鋼船」の NO_x のインベントリを示す。「鋼船」に 1 単位(100 万円)の需要が発生したとき、「銑鉄」で 1.015kg、「道路貨物輸送」で 0.622kg、と続き全体では合計 5.913kg が排出される。自部門からの排出量は相対的に少なく順位も 10 位と低い。「鋼船」の単位直接 NO_x 排出量 0.173kg (表 2 参照) の 33 倍が他部門で排出されることになる。

表5 鋼船のNO_x排出に関するインベントリ

順位	波及先の部門	NO _x 排出量 (Kg)
1	銑鉄	1.015
2	道路貨物輸送	0.622
3	内航輸送	0.592
4	事業用電力	0.524
5	自家発電	0.344
6	石炭製品	0.324
7	自家用貨物自動車輸送	0.321
8	フェロアロイ	0.306
9	熱間圧延鋼材	0.251
10	鋼船	0.173
	...	
	(合計 = NO _x 排出原単位)	5.913

表 6 は「内航輸送」に関する産業連関表の投入表の一部である。国内生産額 1 兆 3,080 億円の生産を行うために、「金融」から 1,001 億円(投入係数 0.076)、「船舶修理」から 850 億円(投入係数 0.065)、と続いて全体では合計 5,689 億円 (投入係数 0.435) の財・サービスの投入があった。

表6 内航輸送の投入額と投入係数(上位10)

順位	投入元の部門	投入額 (100万円)	投入係数
1	金融	100,058	0.076
2	船舶修理	84,983	0.065
3	石油製品	77,293	0.059
4	水運施設管理	48,221	0.037
5	旅行その他の運輸付帯サービス	40,515	0.031
6	卸売	25,641	0.020
7	その他の水運付帯サービス	22,698	0.017
8	損害保険	15,699	0.012
9	広告	15,493	0.012
10	分類不明	14,231	0.011
	...		
	(合計)	568,907	0.435

表 7 に、式 によって推計した「内航輸送」の生

産額ベースのインベントリを示す。「内航輸送」の 1 単位の需要増加に伴って、自部門に 1.009 単位、「金融」に 0.111 単位、と続いて全体では合計 1.785 単位の生産が誘発される。

表7 内航輸送の生産額ベースのインベントリ

順位	波及先の部門	生産額 (単位)
1	内航輸送	1.009
2	金融	0.111
3	船舶修理	0.066
4	石油製品	0.066
5	卸売	0.039
6	水運施設管理	0.037
7	旅行その他の運輸付帯サー	0.032
8	原油・天然ガス	0.023
9	広告	0.020
10	その他の水運付帯サービス	0.018
	...	
	(合計)	1.785

表 8 に、式 で推計した「内航輸送」の NO_x のインベントリを示す。自部門自体からの排出が圧倒的に多く 175.7kg が排出される。これは全体の 99.1% を占める。2 位の「石油」を含めて他部門全体から排出されるのは 1.6kg に過ぎない。

表8 内航輸送のNO_x排出に関するインベントリ

順位	波及先の部門	NO _x 排出量 (Kg)
1	内航輸送	175.734
2	石油製品	0.189
3	水運施設管理	0.180
4	道路貨物輸送	0.154
5	自家用貨物自動車輸送	0.147
6	事業用電力	0.125
7	港湾運送	0.120
8	自家発電	0.078
9	航空輸送	0.064
10	銑鉄	0.061
	...	
	(合計 = NO _x 排出原単位)	177.331

5 . 分析結果 (感度分析)

表 9 に、「鋼船」について式 で求めた変動率感度 399 個のうち上位 10 を示す。「銑鉄」の単位直接排出量が 100%だけ変動すると、「鋼船」の NO_x 排出原単位は 17.17%だけ変動する。以下順に、「道路貨物輸送」、「内航輸送」などの他部門が続く。「鋼船」自身の影響は 10 位に過ぎない。このことから、「鋼船」の NO_x 排出原単位を向上させるために

は、「鋼船」、「道路貨物輸送」、「内航輸送」などの他部門での NO_x の排出削減が有効であり、自部門の努力だけでは効果が低く限定されることになる。

表9 鋼船のNO_xの変動率感度(←式)

順位	j 部門	感度値
1	鉄鉄	0.1717
2	道路貨物輸送	0.1051
3	内航輸送	0.1002
4	事業用電力	0.0886
5	自家発電	0.0581
6	石炭製品	0.0548
7	自家用貨物自動車輸送	0.0543
8	フェロアロイ	0.0518
9	熱間圧延鋼材	0.0425
10	鋼船	0.0293

表 10 に、「鋼船」について式 で求めた変動率感度 $399 \times 399 = 159,201$ 個のうち上位 10 を示す。「熱間圧延鋼材」→「鋼船」の投入係数の影響が最大であり、この値が 100% だけ変動すると、「鋼船」の NO_x 排出原単位は 30.04% だけ変動する。また、鉄鋼部門を中心とする他部門→他部門の投入係数が 2 位、3 位、5 位、7 位、9 位、10 位を占めており、間接的な投入の影響が大きい。

表10 鋼船のNO_xの変動率感度(←式)

順位	j 部門	i 部門	感度値
1	鋼船	← 熱間圧延鋼材	0.3004
2	熱間圧延鋼材	← 粗鋼(転炉)	0.2805
3	粗鋼(転炉)	← 鉄鉄	0.2340
4	鋼船	← 船用内燃機関	0.1295
5	熱間圧延鋼材	← 粗鋼(電気炉)	0.1064
6	鋼船	← 鉄鋼シャースリット	0.0731
7	冷間仕上鋼材	← 熱間圧延鋼材	0.0650
8	鋼船	← 道路貨物輸送	0.0533
9	鉄鋼シャースリット	← 熱間圧延鋼材	0.0447
10	鉄鉄	← 石炭製品	0.0430

表11 内航輸送のNO_xの変動率感度(←式)

順位	j 部門	感度値
1	内航輸送	0.9910
2	石油製品	0.0011
3	水運施設管理	0.0010
4	道路貨物輸送	0.0009
5	自家用貨物自動車輸送	0.0008
6	事業用電力	0.0007
7	港湾運送	0.0007
8	自家発電	0.0004
9	航空輸送	0.0004
10	鉄鉄	0.0003

「内航輸送」について、式 で求めた変動率感度 399 個のうち上位 10 を表 11 に示す。「内航輸送」自身の直接 NO_x 排出量が 100% だけ変動すると、「内航輸送」の NO_x 排出原単位は 99.1% だけ変動する。このように自部門だけで大勢を決し、2 位以下の他部門の影響は軽微である。

「内航輸送」について、式 で求めた変動率感度 159,201 個のうち上位 10 を表 12 に示す。1 位は「内航輸送」→「内航輸送」で自部門同士の投入係数である。また、2 ~ 4 位も「内航輸送」への投入係数である。このように自部門への直接の投入係数に対する感度が高い。

表12 内航輸送のNO_xの変動率感度(←式)

順位	j 部門	i 部門	感度値
1	内航輸送	← 内航輸送	0.0073
2	内航輸送	← 石油製品	0.0022
3	内航輸送	← 船舶修理	0.0018
4	内航輸送	← 水運施設管理	0.0013
5	石油製品	← 内航輸送	0.0007
6	内航輸送	← 港湾運送	0.0006
7	熱間圧延鋼材	← 粗鋼(転炉)	0.0005
8	船舶修理	← 熱間圧延鋼材	0.0005
9	粗鋼(転炉)	← 鉄鉄	0.0005
10	石油製品	← 原油・天然ガス	0.0004

表 11 と表 12 から、「内航輸送」の NO_x に関する LCA を進めるためには、「内航輸送」中心の調査・分析が重要になる。

6. 船舶7部門全体の概要

船舶7部門体の生産額ベースのインベントリと、NO_x 排出に関するインベントリを図 1~4 に示す。生産額と NO_x 排出量の増加を視覚的に把握しやすくするために、1 単位を平成 7 年の国内生産額と同額にしてグラフの目盛を付けた。誘発される国内生産額又は NO_x 排出量の大きい部門を、32 部門(大分類)の名称でグラフ中に記入した。ここで、生産波及によって国内の生産構造が変化することはないものとする。

図 1 に、式 による造船4部門のインベントリの推定結果を示す。いずれの部門の生産額も倍率 2.3 ~ 2.6 の範囲で増加する。

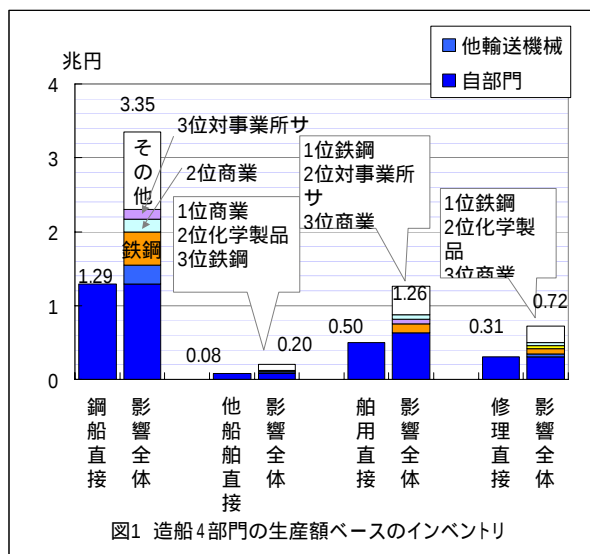


図2に、式による水運3部門のインベントリの推定結果を示す。「外洋」だけが2.9倍に増えるが、その内訳をみると「外洋」自身への波及効果が大きく寄与している。残りの2部門の生産額は倍率1.6～1.8の範囲で増加する。

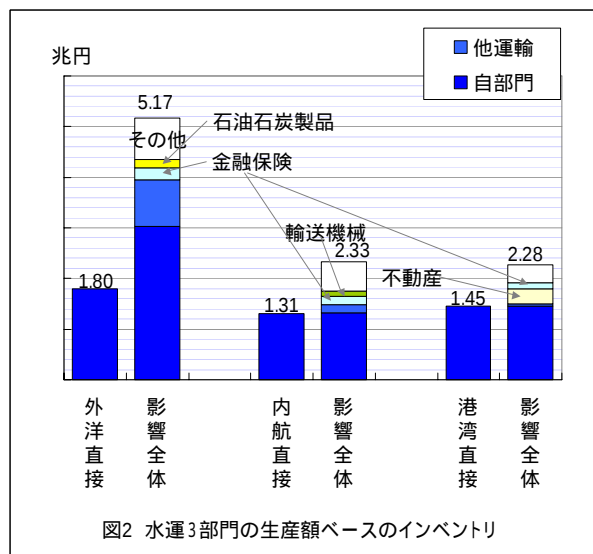


図3に、式による造船4部門のインベントリの推定結果を示す。自部門で直接排出する量に比べて、「鋼船」が34倍、「その他船舶」が10倍、「船用内燃機関」が11倍、「船舶同修理」が40倍のNO_xを排出する。いずれの部門のNO_x排出量も、図1に見られる生産額の増加倍率よりも大きな割合で増加するが、中でも「鋼船」と「船舶同修理」は大きく

増加する。

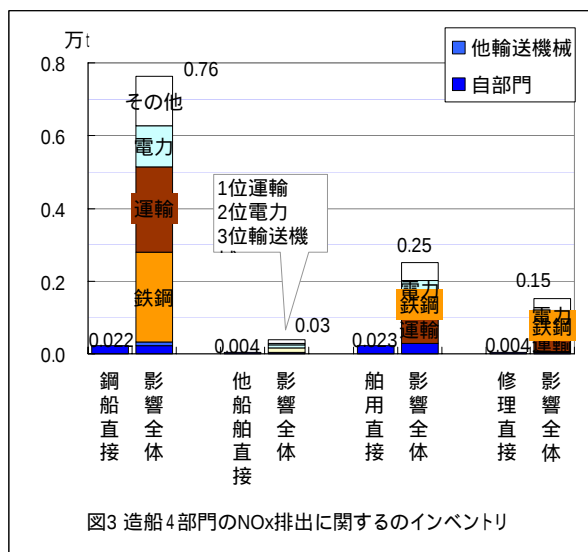
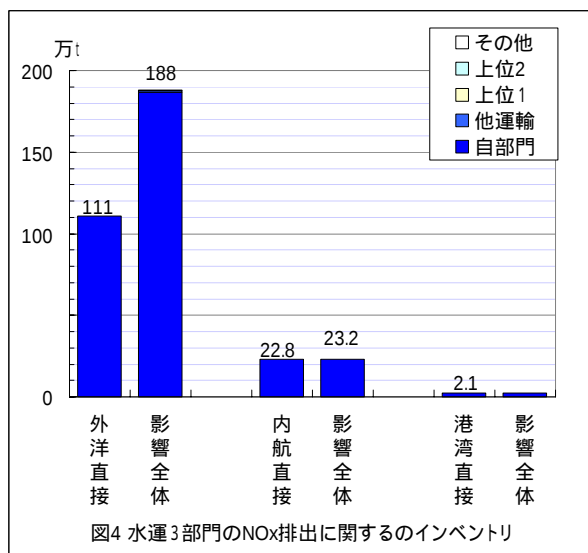


図4に、式による水運3部門のインベントリの推定結果を示す。「外洋」のNO_x排出量の伸びが目立つが、その伸びの大部分は「外洋」自身のNO_x排出量が伸びることによるものである。残りの2部門は、ほとんど増加しない。



7. 「外洋」分析に関する課題

(1) 図2と図4のグラフを見ると、「外洋」だけに顕著な傾向として、外洋直接→影響全体の伸びが大きい。グラフの数値を見ると「外洋」以外は1.0～1.2

倍の伸びであるのに対し「外洋」の伸びだけは 1.7 倍と大きい。更に図 2 と図 4 から、その伸びの大部分を「外洋」自部門への影響が占めている。その原因を表 13 に見つけることができる。表 13 は産業連関表投入係数表の水運 3 部門に関する部分だけを表したものであるが、自部門の交点の投入係数（対角線上の値）のうち「外洋」の投入係数の大きさだけが際だっている。

表13 水運3部門の投入係数表

	…	外洋	内航	港湾	…
…					
外洋		0.40523	0.00001	0.00000	
沿海		0.00287	0.00725	0.00036	
港湾		0.21954	0.00738	0.00002	
…					

表 14 は表 13 の基となっている投入表の一部である。「外洋」の自部門の交点には 7,303 億円が計上されている。この金額が「外洋」の国内生産額 1 兆 8,020 億円の 40.523%（投入係数）を占めるため、自部門同士（「外洋」→「外洋」）の波及効果を増大させている。

表14 水運3部門の投入表

	…	外洋	内航	港湾	…
…					
外洋		730,300(730,300)	12(0)	0	
沿海		5,164(1)	9,477(0)	528(0)	
港湾		395,647(218,428)	9,649(0)	31(0)	
…					

数字の単位は100万円。()内数字は輸入額(内数)を表す

ところが、この 7,303 億円のすべてが輸入額となっているので、その内容を参考文献 1) で調べると、すべて外国への用船料の支払い分ということである。式 で推計すると、このような外国産業との取引も、国内産業間の取引と同様に生産波及することになるが、産業連関表は外国の産業部門をカバーしていないので、この推計には無理がある。

(2) 表 14 によると「港湾」から「外洋」への投入額 3,956 億 4,700 万円のうち 2,184 億 2,800 万円が輸入額であるが、その内容を参考文献 1) で調べると、外国港における日本船籍の船内荷役料に相当するものということである。式 で推計すると、このような外国港での取引も国内取引と同じに扱われることになる。この推計にも無理がある。

8. まとめ

(1) 「鋼船」は、国内生産額に比べると自部門からの NOx 排出量は少ないが、「鋼船」の生産に誘発されて関連産業部門から 33 倍もの NOx が排出されると推定される。そのため、「鋼船」の LCA を進めるためには、鉄鋼、運輸、電力など関連産業部門を含めた調査・分析が重要になる。

(2) 「内航輸送」は、国内生産額に比べると自部門からの NOx 排出量が多いが、「内航輸送」の生産に誘発される関連産業部門からの NOx 排出量は軽微であると推定される。そのため、「内航輸送」の LCA を進めるためには、専ら「内航輸送」の内部を中心とする調査・分析が重要になる。

(3) 「外洋輸送」は、外国への用船料などの国際的取引が大きな割合を占めるために、国内だけを対象とする産業連関表からは実態に即した分析はできない。

(4) 産業連関表データと 3EID をデータベース化し、取引基本表の逆行列計算、インベントリ分析と感度分析を行うための一連のソフトウェアツールを作成・整備した。

参考文献

- 1) 平成7年(1995年)産業連関表 総合解説編、pp.306、pp.307
- 2) 産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)、国立環境研究所、2002/3/29
- 3) 本藤祐樹：「産業連関表を用いたインベントリ分析手法への感度分析の導入」、エコマテリアル研究会WS No46、2001/5/18
- 4) 福元正明他：「船舶へのLCAの適用研究 産業連関表に基づく造船の関連産業の影響分析」、平成14年度海上技術安全研究所研究発表会講演集pp.181-184