

船舶運航のインベントリ分析

環境・エネルギー領域 * 亀山 道弘、平岡 克英

1. はじめに

これまで船舶の運航に関するライフ・サイクル・インベントリ (LCI) 分析は、CO₂ 排出量に関してタンカーや撤積運搬船を対象に 2 港間での航走と荷役に関して実施してきた。¹⁾しかし、日本の海上貿易で使用する船種やその運航形態は多種多様であり、また、解析対象とする環境負荷物質も広範囲に及ぶため、船種の特性を考慮した解析方法を整備することが求められている。

そのため、日本の海上貿易で使用される代表的な船種と考えられるタンカー、LNG 船、撤積貨物船、コンテナ船及び自動車運搬船 (PCC) を対象に、運航記録の調査結果に基づいて船舶運航の

LCI 分析を行い、船舶運航に関するインベントリデータとして、単位輸送量での CO₂、NO_x 及び SO_x 等の環境負荷物質の排出量を明らかにする。

2. 対象船舶と運航条件

解析の対象とした 8 隻の船種の主要目を表-1 に示す。また、運航記録の調査結果 ²⁾³⁾⁴⁾ に基づいて作成した各船の航海条件と機関の負荷率を表-2 及び表-3 に示す。

船舶の使用期間は 25 年、また、定期的検査に伴う入渠は 2.5 年に 1 回とした。検査による不稼働日数は LNG 船を除き 8 日とした。以下に解析に際して船種別に考慮した運航条件をまとめる。

表-1 船舶の主要目

項 目	単位	船 種							
		96タンカー	260タンカー	91撤積船	140撤積船	127LNG	4700コンテナ船	6100コンテナ船	4500PCC
貨物の種類		原油	原油	石炭	石炭	LNG	コンテナ	コンテナ	自動車
載貨重量	ton	96,106	259,998	91,000	142,235	67,554	63,014	82,275	17,183
載貨容積	m3	112,580m3	317,199m3	118,600m3	181,689	127,550m3	4,743TEU	6,148 (TEU)	4515Cars
満載航海速力	kt	14.0	15.0	14.0	13.7	19.3	23.5	23.0	18.8
乗員	人	—	46	28	25	30	30	30	29
主機関種類	—	ディーゼル	ディーゼル	ディーゼル	ディーゼル	蒸気タービン	ディーゼル	ディーゼル	ディーゼル
主機関出力(MCR)	kW	10,201	21,770	10,800	12,136	23,536	43,620	52,956	10,810
ディーゼル発電機	kW	610×3台	740×4台	530×3台	680×3台	1380×1台	1600×4台	2100×4台	800×3台
ターボ発電機	kW	/	740kW×1	/	/	2500kW×2	1500kW×1	1500kW×1	/
補助ボイラー	t/h	30	85	1.7	1.5	55×2	13	13	1.5
主貨油ポンプ	m ³ /h	2500×3	5500×3	/	/	1400×8	/	/	/
建造年 (起工)	西暦	1991年	1989年	1994年	1989年	1991年	1994年	1997年	1992年

表-2 船舶の運行計画

項 目		船 種							
		96タンカー	260タンカー	91撤積船	140撤積船	127LNG船	4700コンテナ船	6100コンテナ船	4500PCC
想定した航路		不定期航路	日本-中東	日本-豪州	日本-豪州	日本-Bontang	北米航路	北米航路	59航海平均
1. 往路	距離（海里）	2, 450	6, 874	4, 226	4, 400	2, 502	6, 452	8, 201	7, 324
	速力（kt）	13. 5	14. 7	14. 5	14. 2	15. 2	23. 6	22. 8	16. 6
	貨物積載率（%DWT）	0	2. 6	0	0	0	49	41	27
	貨物積載率（%）	－	－	－	－	－	85（%TEU）	75（%TEU）	73（%Car）
	航行日数（day）	7. 6	19. 5	12. 1	12. 9	6. 9	11. 4	15. 0	18. 4
	停泊日数（day）	3. 6	4. 1	5. 18	6. 0	1. 94	2. 68	3. 33	2. 50
2. 復路	距離（海里）	3, 299	6, 871	4, 226	4, 412	2, 502	6, 582	8, 468	4, 084
	速力（kt）	12. 7	13. 0	13. 2	12. 9	15. 8	22. 2	22. 6	16. 4
	貨物積載率（%DWT）	74	94	97	96	87	31	43	0
	貨物積載率（%）	－	－	－	－	98（%vol）	64（%TEU）	76（%TEU）	0
	航行日数（day）	10. 8	22. 0	13. 3	14. 3	6. 6	12. 4	15. 6	10. 4
	停泊日数（day）	4. 3	4. 1	4. 7	5. 6	1. 03	6. 04	8. 27	4. 46
航海日数（day）		26. 3	49. 7	35. 4	38. 8	16. 4	32. 5	42. 2	35. 8

注1：260タンカーの航海距離には集荷航行と揚荷航行を含み、速力と貨物積載率はその平均値とした。
2：4700コンテナ船は香港、6100コンテナ船はマレーシアPort Kelangをベースとして運航。また、貨物積載率 (DWT) はコンテナ自重を含む。
3：127LNG船の漂流時間 (往路26. 2h、復路0. 1h) は各々の停泊日数に含めた。
4：4500PCCの航海距離には集荷航行と揚荷航行を含み、速力は平均速力とした。また、貨物積載重量 (率) は全航海での平均値で、往路に示した。

2.1 タンカー

96 タンカーは東南アジアを中心とした不定期航路、また、260 タンカーは日本と中東間の定期航路での運航を対象とした。260 タンカーは複数の港において原油の船積み（集荷航行）と荷揚げ（揚荷航行）を行う。

2.2 撤積貨物船

撤積貨物船は石炭を貨物とし、日本と豪州の定期的な往復航海を対象とした。

2.3 LNG 船

LNG 船は日本とインドネシア Bontang 間での定期航路に就航している。航行には積荷の液化天然

ガス (LNG) の気化ガス (BOG) と船舶用燃料 (M. F. O) を使用する。LNG 船は航海において入港時間の調整等のため 1 日程度の漂流を行う。そのため、航行速力は漂流時間を除いて航行時間に基づいて算出した。また、定期的検査に伴う不稼働日数は調査結果に基づき 48 日とした。

往路（バラスト）と復路（満載）の漂流状態での機関の負荷率は便宜的に表-3 の集荷航走と揚荷航走に記した。また、LNG 比重量は 0.467t/m³ とし、載貨容積に対する搭載率を 98%とした。

2.4 コンテナ船

コンテナ船は北米航路を想定した。4700 コン

表-3 機関の負荷率

機関種類	航海状態	船 種									
		96タンカー	260タンカー	91撤積船	140撤積船	127LNG船	4700コンテナ船	6100コンテナ船	4500PCC		
主機関	航走	往路/空荷	76.5 %	75.9 %	86.8 %	79.1 %	61.0 %	72.0 %	75.0 %	79.5 %	
		集荷航走	—	63.1 %	—	—	20.8 %	—	—	56.2 %	
		復路/積載	77.0 %	73.1 %	86.9 %	79.5 %	74.5 %	56.6 %	74.2 %	79.3 %	
		揚荷航走	—	47.8 %	—	—	35.6 %	—	—	68.2 %	
	停泊	船積	0 %	0.5 %	2.0 %	0.6 %	19.4 %	2.9 %	2.0 %	10.7 %	
		荷揚	0 %	0.2 %	1.7 %	0.6 %	24.5 %	5.4 %	1.0 %	14.0 %	
		最大積載航行	—	—	—	—	—	—	—	10.2 %	
	ディーゼル 発電機	航走	往路/空荷	82.4 %	10.5 %	74.7 %	67.4 %	—	1.4 %	2.9 %	39.1 %
			集荷航走	—	38.2 %	—	—	—	—	—	27.7 %
			復路/積載	89.6 %	7.9 %	70.1 %	63.6 %	—	18.6 %	34.2 %	41.0 %
揚荷航走			—	38.2 %	—	—	—	—	—	35.3 %	
停泊		船積	81.4 %	71.2 %	77.8 %	64.5 %	—	36.5 %	52.9 %	93.6 %	
		荷揚	105.6 %	102.4 %	59.7 %	51.7 %	—	50.5 %	50.7 %	120.8 %	
		最大積載航行	—	—	—	—	—	—	—	114.5 %	
補助 ボイラー	航走	往路/空荷	2.9 %	0.7 %	3.8 %	0.5 %	—	0 %	1.4 %	0.5 %	
		集荷航走	—	1.3 %	—	—	—	—	—	0.2 %	
		復路/積載	13.3 %	0.4 %	2.9 %	0.5 %	—	0 %	1.2 %	0.5 %	
		揚荷航走	—	1.7 %	—	—	—	—	—	0.4 %	
	停泊	船積	6.6 %	5.3 %	37.1 %	76.1 %	—	72.3 %	64.1 %	87.2 %	
		荷揚	33.6 %	24.8 %	37.9 %	78.4 %	—	71.2 %	65.4 %	94.5 %	
		最大積載航行	—	—	—	—	—	—	—	103.9 %	

備考1.各機関の出力は定格出力に対する出力%とした。

2.主機関の定格出力は連続最大出力（MCR）とし、ディーゼル発電機は1台分の出力を100%とした。

3.127LNG船の主機関の集荷航走と揚荷航走の負荷率は各々往路と復路での漂流状態での負荷率を示す。

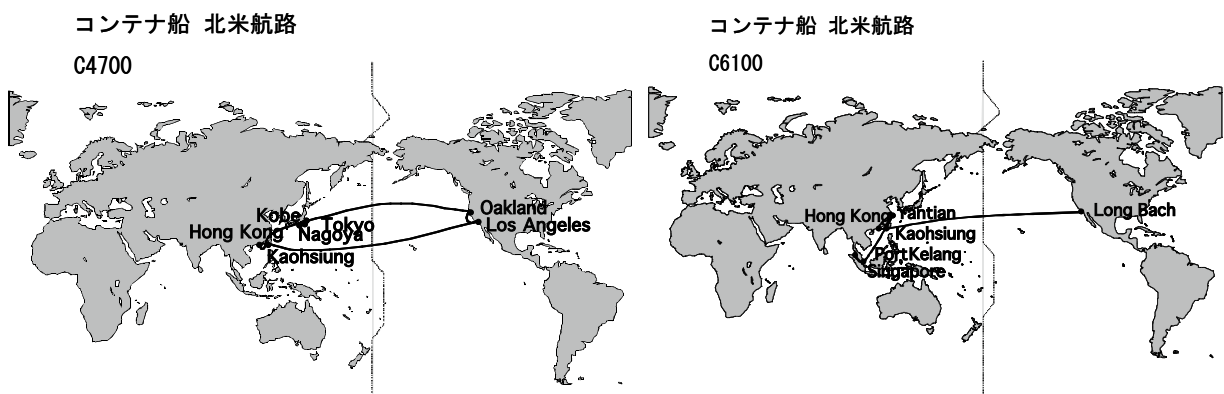


図-1 コンテナ船の北米航路（左：4700 コンテナ船、右：6100 コンテナ船）

テナ船と 6100 コンテナ船で想定した航路と寄港地を図-1 に示す。コンテナ重量（貨物重量+コンテナ自重）は運航記録の分析結果に基づき、4700 コンテナ船では往路 7.8t/TEU 及び復路 6.4t/TEU、また、6100 コンテナ船では往路 7.3t/TEU 及び復路 7.5t/TEU とした。

2.5 自動車運搬船(PCC)

自動車運搬船は日本、北米、欧州を積地とし、世界各国に寄港している。そのため、本解析では全航海の平均として航路等の運航条件を設定した。また、自動車の平均重量を 1.54t/Car とした。

3. 解析条件

3.1 環境負荷物質

解析の対象とした環境負荷物質は、石油や LNG ガス等の天然資源に加え、運航に関する概略的な感度分析の実施結果⁵⁾等から主機関運転による影響が大きいと考えられ、大気中への排出物は以下の物質を対象とした。

CO₂、NO_x、SO_x、CO、HC、PM、CH₄、NMVOC、N₂O
また、海洋への排出は防汚塗料を対象とした。

3.2 システム境界

運航での解析対象は船舶の航走、荷役及び定期的検査のための入渠とした。ただし、原油の荷役に伴う VOC や自動車の荷役に伴う排気ガス等、貨物に起因する排出は対象としなかった。

関連するプロセスは、主機関、ディーゼル発電機及びボイラーの運転、防汚塗料の溶出等の船

舶の運航の直接関わるプロセスと燃料及び各種素材の製造とした。しかし、ビルジ水、船体防食用の陽極金属板、ボイラー洗浄水及びタンク洗浄水等による海水への排出は、航路や船舶の設備等による影響が大きいため、今回の解析では対象物質とはしなかった。また、港湾設備の利用やスラッジや可燃物の焼却等の排出物処理はシステムの対象とはしなかった。

3.3 プロセスデータ

主機関、ディーゼル発電機及びボイラーの運転に関するプロセスデータは、IPCC のガイドライン等^{6) 7)}に基づいて作成した。本解析で使した船舶機関の運転に関する排出データを表-4 に示す。また、防汚塗料の溶出速度はメーカーから聞き取り調査に基づき、航走時 5.5 μm/Month と停泊時 2.0 μm/Month とし、防汚塗料の溶出量は船舶の浸水表面積等に基づいて算出した。

燃料や塗料等の製造に関するインベントリデータには各種のデータベースを利用した。⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

4. 解析結果

4.1 燃料消費量

設定した運航条件に基づき各船の運航に関してインベントリ分析を実施した。停泊を含めた運航での燃料消費量の解析結果を表-5 に示す。実績調査^{2) 3) 4)}に対応させた航行条件等を設定したため、各船の燃料消費量は、実績値と一致している。なお、LNG 船で消費する積荷の BOG の熱量

表-5 燃料消費量（解析結果）

船 種	燃料消費量	
	単位輸送量	単位航進距離
	g/t-mile	t/mile
96タンカー	3.7	0.15
260タンカー	1.7	0.22
127LNG船	10.3	0.30
91撤積運搬船	2.9	0.13
140撤積運搬船	2.0	0.14
4700コンテナ船	14.0	0.26
6100コンテナ船	12.7	0.33
4500PCC	32.0	0.10

注：燃料消費量はMF0+MD0+シリンドラ油の合計値

LNG船のBOG消費量は熱量等価MF0量で換算した。

表-4 機関運転のプロセスデータ

排出物	ディーゼル機関 2ストローク	ディーゼル機関 4ストローク	ボイラー
	g/kg-fuel	g/kg-fuel	g/kg-fuel
CO ₂	37×%C		
NO _x	87	57	6.8
SO _x	20×%S		
CO	7.4	7.4	0.6
HC	2.4	2.4	—
PM	7.6	7.6	—
CH ₄	0.29	0.29	0.12
NMVOC	2.1	2.1	—
N ₂ O	0.08	0.08	0.01

注1：%Cと%Sとは燃料中の炭素分と硫黄分（重量%）

2：燃料の発熱量は9600kcal/kg相当

3：IPCCガイドライン等に基づく。

表-6 船舶運航のインベントリデータ（輸送量 t-mile 当たりの環境負荷量）

環境負荷項目		単位	96タンカー	260タンカー	91撤積船	140撤積船	127LNG船	4700コンテナ船	6100コンテナ船	4500PCC
資源	ボーキサイト	g	-1.5E-03	-7.0E-04	-1.2E-03	-8.2E-04	-2.1E-03	-5.7E-03	-5.2E-03	-1.3E-02
	鉄鉱石	g	-4.0E-06	-2.7E-06	-4.0E-06	-3.1E-06	0.0E+00	-2.7E-05	-1.9E-05	-4.8E-05
	石炭	g	-2.4E-02	-1.1E-02	-1.9E-02	-1.3E-02	-3.4E-02	-9.0E-02	-8.3E-02	-2.1E-01
	原油	g	-3.8E+00	-1.8E+00	-3.0E+00	-2.1E+00	-5.5E+00	-1.4E+01	-1.3E+01	-3.3E+01
	天然ガス	g	-2.7E-01	-1.3E-01	-2.1E-01	-1.5E-01	-4.7E+00	-1.0E+00	-9.3E-01	-2.3E+00
大気中への排出	CO ₂	g	1.2E+01	5.7E+00	9.7E+00	6.7E+00	3.0E+01	4.6E+01	4.2E+01	1.1E+02
	NO _x	g	2.5E-01	1.4E-01	2.5E-01	1.7E-01	1.4E-01	1.2E+00	1.1E+00	2.7E+00
	SO _x	g	1.8E-01	9.5E-02	1.7E-01	1.2E-01	3.2E-01	8.0E-01	7.4E-01	1.9E+00
	CO	g	2.2E-02	1.2E-02	2.1E-02	1.5E-02	1.3E-02	9.9E-02	9.2E-02	2.3E-01
	CxHy	g	1.4E-02	7.1E-03	1.3E-02	8.7E-03	1.0E-02	5.9E-02	5.4E-02	1.4E-01
	PM	g	2.2E-02	1.2E-02	2.2E-02	1.6E-02	1.3E-03	1.0E-01	9.5E-02	2.4E-01
	CH ₄	g	9.2E-04	4.7E-04	8.3E-04	5.7E-04	2.4E-03	3.9E-03	3.6E-03	9.1E-03
	NM VOC	g	6.0E-03	3.3E-03	6.0E-03	4.2E-03	6.5E-10	2.8E-02	2.6E-02	6.5E-02
	N ₂ O	g	2.7E-04	1.4E-04	2.5E-04	1.7E-04	2.8E-04	1.2E-03	1.1E-03	2.8E-03
	塗膜分解生成物	g	5.3E-04	1.2E-04	4.5E-04	3.9E-04	6.8E-04	7.8E-04	5.7E-04	2.9E-03
水中への排出	塗膜分解生成物	g	5.3E-04	1.2E-04	4.5E-04	3.9E-04	6.8E-04	7.8E-04	5.7E-04	2.9E-03

注：資源における表中の（-）は消費を意味する。また、E+0aとE-0bは各々×10（+a）及び×10（-b）を意味する。

換算等価 M.F.O 量は 1.17 とした。

燃料の製造での環境負荷物質の排出等も含めた各船の運航に関する単位輸送量（t-mile）当たりのインベントリデータを表-6 に示す。なお、LNG 船での BOG の消費量は積荷の 1%程度と小さいため、輸送量の算出では BOG の消費量を無視した。

4.2 排出プロセス

各船の CO₂ の排出量のプロセスの内訳を図-2 に示す。ボイラーにより貨物の原油の加熱を行う 96 タンカーを除き、主機関の排主出量が 90%程度を占めた。また、燃料の製造による CO₂ 排出が LNG 船を除き 7%程度を占めた。

NO_x 及び SO_x 等、他の大気中への環境負荷物質の排出も CO₂ と同様に主機関の運転に伴う排出が大部分を占め、主機関、ディーゼル発電機、ボイラーの運転及び燃料の製造において大気中への環境負荷物質の排出が殆ど行われる。CO₂、NO_x 及び SO_x 等の排出量の内訳の詳細を 6100 コンテナ船を例に図-3～5 に示す。また、海洋中への塗膜溶出物質は航海及び停泊中に排出される。

4.3 船種の比較

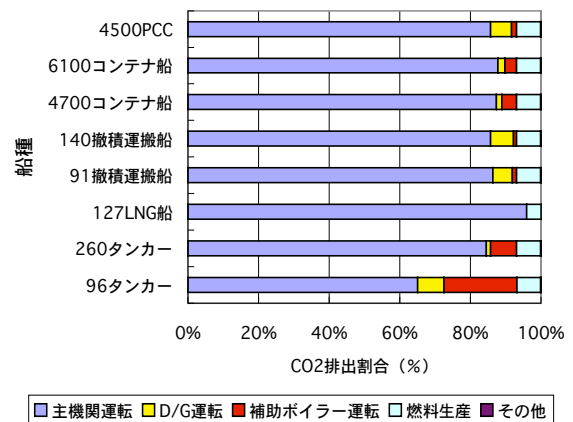
CO₂、NO_x 及び SO_x の排出量の船種による比較を図-6～8 に示す。コンテナ船や自動車運搬船は満載載貨重量 (DWT) に対する貨物の積載率 (%DWT) が小さいため、単位輸送量当たりの環境負荷物質の排出量はタンカー等には比べコンテナ船で約 5

倍、また、自動車運搬船では約 10 倍となった。一方、LNG 船は主機関がボイラー炊きの蒸気タービンであるため、NO_x 排出量はタンカーや撤積貨物船に比べ少なくなった。

タンカー等の同じ船種では、より大型船の方が環境負荷物質の単位輸送量当たりの排出量は少なく、貨物の搭載量の増加に反比例的に小さくなる傾向が見られた。

5. まとめ

船種の特性を考慮してインベントリ分析の手法を作成し、運航記録に基づいた日本の各種船舶の輸送に関する単位輸送量当たりのインベントリデ

図-2 CO₂ 排出量の内訳（船種）

ータを作成した。

6. 謝辞

本研究の実施においては、海上技術安全研究所に設置した「船舶 LCA 研究委員会」の委員の方々に、懇切なご指導とご助言を頂いた。また、日本郵船（株）殿及び（株）商船三井殿には貴重な資料を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

なお、本研究は地球環境保全等試験研究費（公害防止）として実施しました。

参考文献

- 1) 亀山道弘 他、船舶運航の CO2 インベントリデータに関する研究、平成 13 年度（第 1 回）独立行政法人 海上技術安全研究所 研究発表会講演集、p157-162、
- 2) 木原 健 他、船舶への LCA の適用に関する調査研究、海上技術安全研究所報告 第 2 巻 第 2 号（平成 14 年）総合報告、平成 14 年 12 月
- 3) 平岡克英 他、PCC 船の運航記録による運行状況調査、平成 15 年度（第 3 回）独立行政法人 海上技術安全研究所 研究発表会講演集、p365-368、
- 4) 平岡克英 他、船舶の LCA のための運航データ解析、平成 16 年度（第 4 回）独立行政法人 海上技術安全研究所 研究発表会講演集
- 5) 亀山道弘 他、船舶の運航のインベントリ分析と感度分析の適用、平成 15 年度（第 3 回）独立行政法人 海上技術安全研究所 研究発表会講演集、p235-236
- 6) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual
- 7) Lloyd's Register, Marine Exhaust Emissions research Programme
- 8) PreConsultants, SimaPro5.1
- 9) （社）産業環境管理協会, JEMAI-LCAVer1.1.5,
- 10) 日本 LCA フォーラム, LCA データベース, 2004 年 2 月

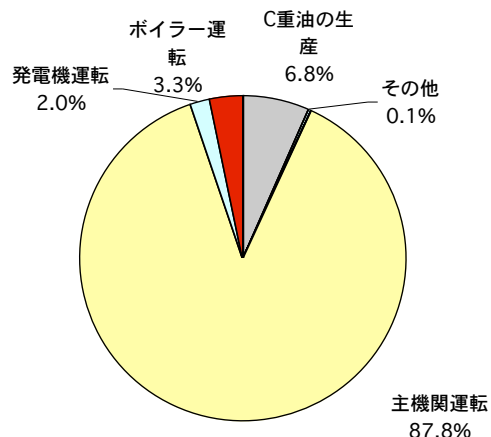


図-3 CO2 排出量の内訳（6100 コンテナ船）

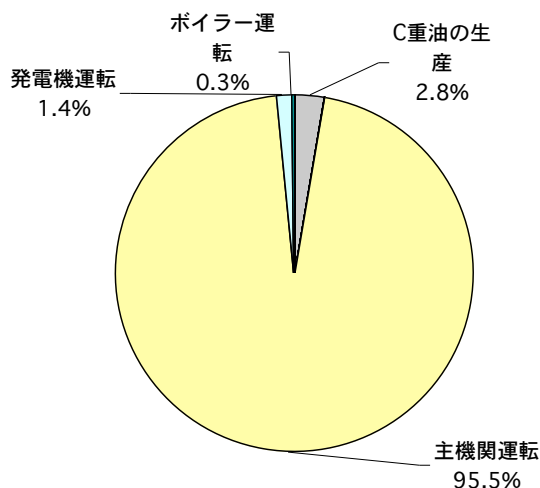


図-4 NOx 排出量の内訳（6100 コンテナ船）

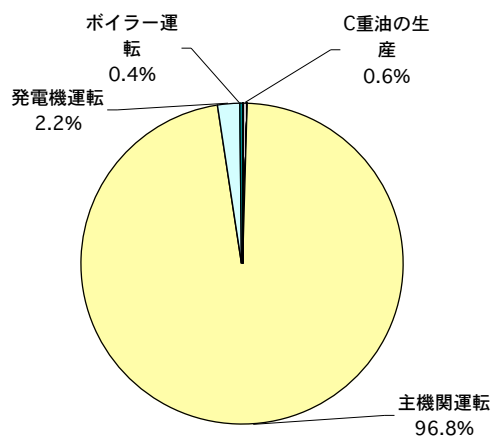


図-5 SOx 排出量の内訳（6100 コンテナ船）

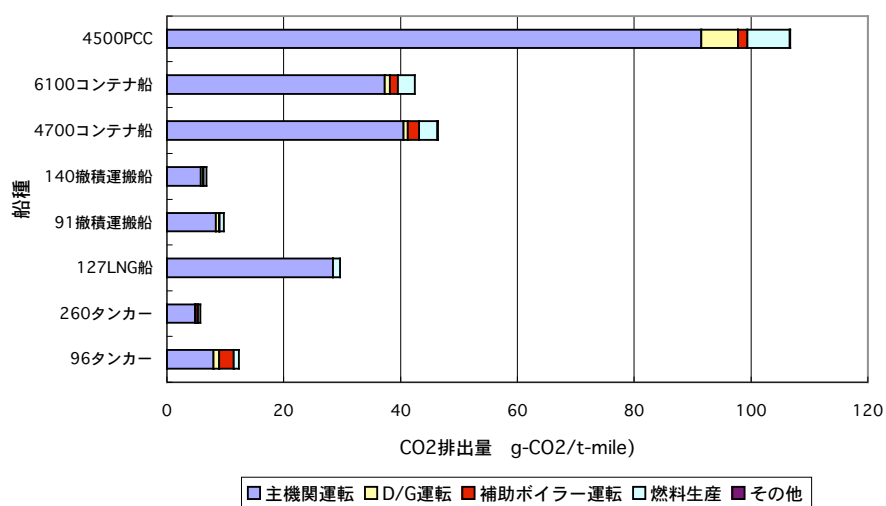


図-6 単位輸送量当たりの CO2 排出量の船種比較

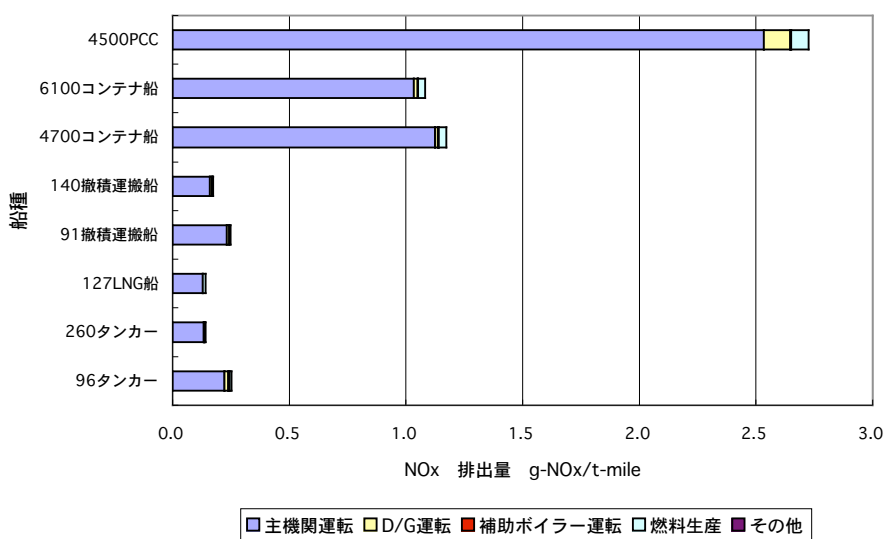


図-7 単位輸送量当たりの NOx 排出量の船種比較

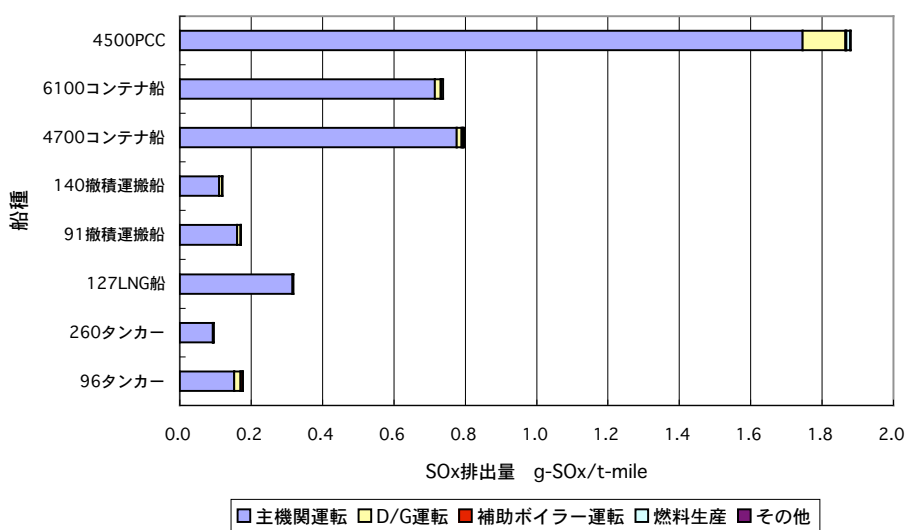


図-8 単位輸送量当たりの SOx 排出量の船種比較