

## ■ 研究論文 ■

# 化石燃料の国内消費に伴い海外で誘発される 環境影響物質—CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>排出量—

Overseas Environmental Burdens Induced by Consumption of Fossil Fuels in Japan  
—The Amount of CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> Emissions—

本 藤 祐 樹\*・内 山 洋 司\*\*・外 岡 豊\*\*\*

Hiroki Honda Yohji Uchiyama Yutaka Tonooka

(原稿受付日1999年1月25日, 受理日1999年4月14日)

## Abstract

Consumption of fossil fuels induces the indirect emissions of environmental burdens at the extraction, processing and transportation besides the direct emissions at the combustion. Since almost all the amount of coal, oil and LNG are imported in Japan, the domestic consumption of these fossil fuels induces indirect emissions of environmental burdens outside the country. In this study, we have quantitatively analyzed the overall amount of CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions inside and outside the country induced by the consumption of three different fossil fuels in Japan. Our findings could be briefly summarized as follows: (1) The amount of overseas CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions accounts for 6%, 21% and 14%, respectively, of the overall emissions. (2) The shares of the open sea transportation to the overseas emissions are 29%, 37% and 83%, in terms of CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions, respectively. (3) The overall emissions of CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> for LNG are the least among three different fossil fuels, whereas the contribution of overseas to the overall emissions for LNG is the largest concerning CO<sub>2</sub>. These results are very useful information to plan tactics for use of fossil fuels in the future from environmental aspect.

## 1. はじめに

現在, 化石燃料はあらゆる生産および消費活動において必要不可欠なものとなっている。しかし, その消費に伴い地球温暖化や酸性雨などの広域的な環境問題の原因となる物質が排出される。ライフサイクルの観点から見ると, 化石燃料はその消費時点だけでなく, 生産および消費地への輸送においても環境負荷を発生している。我が国の場合, 化石燃料のほとんどを輸入に依存しているため, 国内での化石燃料の消費は国外での環境負荷を誘発することになる。国内消費によって引き起こされる国外での環境影響物質の排出について今後対応を迫られる可能性がある。それ故に, 国外で誘発される環境影響物質の排出量を定量的に把握しておくことは重要である。過去に化石燃料の生産およ

び輸送段階での温暖化ガスの発生量が推計されてきた<sup>1) 2)</sup>。既往の分析結果を用いて, 温暖化ガスについて国外での誘発排出量を知ることは可能である。しかし, これらの分析は温暖化ガスに限られている, 十分なライフサイクルが取られていない, 現時点ではデータが古いなどの問題を抱えている。本研究の第一の目的は, 化石燃料の国外における生産および輸送時のCO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>排出量を実態に即して推計する手法を確立し, それに基づき実際に推計することである。第二の目的は, 国外での誘発排出量を国内での消費段階における排出量と比較することで, 我が国の化石燃料消費が国外においてどの程度の環境影響を与えているのかを明らかにすることである。

## 2. 化石燃料の輸入に伴う排出量の推計

### 2.1 検討対象

対象とする化石燃料は, 石炭, 原油, LNGの3種類である。1997年度の輸入量はそれぞれ132.5百万t, 267.5百万kl, 45.5百万tであり, 輸入依存率はいずれも95%以上に達している<sup>3)</sup>。検討範囲は図1に示され

\* (財)電力中央研究所 経済社会研究所主任研究員

\*\* " " 上席研究員

〒100-0004 東京都千代田区大手町1-6-1

\*\*\* 埼玉大学経済学部社会環境設計学科教授

〒338-0825 埼玉県浦和市下大久保255

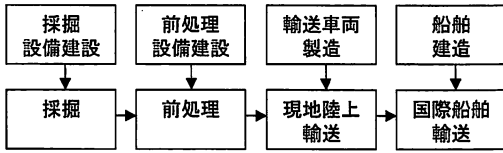


図1 検討範囲

るように、採掘、前処理、現地輸送、船舶国際輸送に伴う設備建設および運用である。つまり、海外において資源が採掘され日本の港に到着するまでを対象としている。目的とする環境影響物質は、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の3種類である。

2.2 採掘、前処理、現地輸送に必要な設備建設

石炭、原油、LNGの採掘・前処理・現地輸送に用いられている設備に関して、文献調査および関連事業者への聞き取り調査を実施した。石炭および原油については海外で実際に採掘を実施している事業者などから得た調査結果を、LNGについては文献<sup>4)</sup>を利用す

ることとした。石炭はオーストラリア(1997年度)、原油は中東(1998年)、LNGはインドネシアを対象としている。調査対象とした鉱山、油田、ガス田の生産量と、利用設備に必要な素材量および耐用年数などから、各化石燃料1単位を生産し輸送するために必要な素材量を算出した。表1にまとめた結果を示す。これらの値は各鉱山、各油田、各ガス田により異なる可能性があるが、本研究では表1の値を代表値として採用した。ただし、石炭輸送は輸送距離(表2)を反映して国別に求めており、表1に示したのは平均値である。また、採炭設備に必要な素材量は、各国別に坑内掘りと露天掘りの比率(表2)を反映して求めた。

表1の素材必要量(M)および燃料消費量(C)を基に、化石燃料1単位あたりの設備建設に伴う排出量(E'<sub>n</sub>)を式1に従って推計した。式1のh, i, jはそれぞれ、環境影響物質、素材、燃料の種類を表す。燃料の排出係数(CF)は表3に、素材の排出原単位(MF)は表4に示している。設備の製造および建設

表1 生産・現地輸送設備製造に必要な素材量およびエネルギー

	耐用年数	鉄	銅	ゴム	コンクリ	セメント	A重油
		kg/t, kl	kg/t, kl	kg/t, kl	kg/t, kl	kg/t, kl	l/t, kl
石炭 (t)	採炭(露天)	10	0.340				
	採炭(坑内)	10	0.239				
	選炭	10	0.018	0.015		0.034	
	輸送	30	0.043	0.003			
原油 (kl)	採取・前処理	30	0.625		0.043	0.071	0.041
LNG (t)	採取・液化	30	1.711	0.006	1.933		0.252

石炭は貯炭場、港湾施設、付属建物(事務所など)は含まない。

原油とLNGは試掘を含む。港湾施設、付属建物は含まない。聞き取り調査と文献<sup>4)</sup>より

表2 各国の採炭方法比率と石炭輸送距離

国	採炭方法比率		輸送距離 km
	露天掘り	坑内掘り	
オーストラリア	67.5%	32.5%	187
インドネシア	100.0%	0.0%	23
中国	8.2%	91.8%	455
南アフリカ	39.8%	60.2%	534
アメリカ	58.8%	41.3%	1125
カナダ	100.0%	0.0%	1132
ロシア	48.7%	51.4%	2996
コロンビア	100.0%	0.0%	184
その他	29.6%	70.4%	23

その他はベトナム、北朝鮮、ニュージーランド。文献<sup>2), 7), 8), 10)</sup>より

表3 燃料の排出係数

燃料 (物量単位)	熱量 Mcal /物量	排出係数			
		kg-CO <sub>2</sub> /Gcal	g-CO <sub>2</sub> /Gcal	g-NO <sub>2</sub> /Gcal	
随伴 ガス (千m <sup>3</sup> )	中東	11500	232.2	3217	817.4
	南方	12600	225.4	0	817.5
	中国	11500	229.6	0	817.4
	他地域	11500	232.2	3217	817.4
天然 ガス (t)	マレーシア	12036	213.4	0.000	163.1
	ブルネイ	12288	214.3	0.000	163.1
	インドネシア	12076	213.8	0.000	163.1
	U A E	13080	215.9	0.719	163.1
	アメリカ	12338	206.8	0.000	163.1
	オーストラリア	12462	211.6	0.754	163.1
ガソリン (kl)	8400	280.8	0.008%	789.3	
軽油 (kl)	9200	287.4	0.398%	2102.2	
A重油 (kl)	9300	290.1	0.480%	3021.2	
C重油 (kl)	9800	297.5	1.680%	393.5	

ガソリン、軽油、重油のSO<sub>x</sub>排出係数は燃料中の硫黄分(重量百分率)。

随伴ガスのフレアによるNO<sub>x</sub>排出係数は100g-NO<sub>2</sub>/Gcal。

軽油のディーゼル機関車によるNO<sub>x</sub>排出係数は4783g-NO<sub>2</sub>/Gcal。

聞き取り調査と文献<sup>2), 5), 9), 10)</sup>より

表4 素材・資材の排出原単位

	t-CO <sub>2</sub> /t	kg-SO <sub>2</sub> /t	kg-NO <sub>2</sub> /t
鉄	1.22	2.36	4.82
銅	2.25	4.10	3.89
セメント	0.81	0.21	1.55
コンクリート	0.11	0.05	0.26
ゴム	3.81	6.38	7.69
火薬	1.31	1.45	2.29

文献<sup>9)</sup>より

表5 排出比率

	CO <sub>2</sub>	SOx	NOx
石炭	1.32	1.16	0.77
原油	0.60	0.47	0.31
LNG	0.72	0.61	0.41

時には素材製造だけでなく素材加工や部品輸送などに伴い環境影響物質が排出される。これらの排出量は素材製造時の排出量に排出比率 (R) を掛けあわせることで求めた。排出比率は表1に示す素材の製造に伴う排出量に対する他工程での排出量の比として定義され、ここでは表5に示す値を用いた。素材の排出原単位および排出比率は我が国の1990年の産業連関表を用いて求めた値であり、我が国の生産構造の基で生産された場合を前提とした。なお、排出原単位および排出比率の推計方法に関しては文献<sup>5) 6)</sup>を参照されたい。

$$E_h^1 = \left( \sum_i M_i \times MF_{hi} \right) \times (1 + R_h) + \sum_j C_j \times CF_{hj}$$

式1

2.3 採掘, 前処理, 現地輸送

石炭, 原油, LNGの採掘, 前処理, 現地輸送のために1年間に必要な燃料および電力と年間生産量を調査した。石炭については事業者への聞き取り調査及び文献<sup>9)</sup>より, 原油については文献<sup>9)</sup>から, LNGについては文献<sup>1)</sup>から得た値を用いている。これらの調査結果から算出した石炭と原油の1単位あたりの燃料および電力消費量を表6に示す。石炭は輸送を除いてオーストラリア(1997年度), 原油は中東とノルウェーの実態調査から設定された値である。石炭輸送はJR貨物の値<sup>10)</sup>である。これらの値は各鉱山, 各油田により異なる可能性があるが, 本研究では表6に示す値を代表値として採用した。ただし, 石炭については, 採炭方法(表2), 現地輸送距離(表2), 電源構成<sup>10)</sup>について各国の違いを反映させた。なお, 石炭の輸送にはディーゼル機関車を用いると仮定した。他方, 天然ガスの液化に伴う燃料消費は表7に示すように各国別に設定した。

表6 原油・石炭の生産・現地輸送によるエネルギー消費量

	随伴ガスm <sup>3</sup> /kl	軽油 l/t	ガソリンl/t	電力kWh/t
原油採掘・前処理	9.900			
石炭採掘(露天)		4.5900	0.0272	2.906
石炭採掘(坑内)		0.1641	0.0271	11.220
選炭		0.6582	0.0037	7.765
石炭輸送		0.0128		

石炭輸送の軽油消費量の単位はl/t・km, 文献<sup>9), 10)</sup>と聞き取り調査より

採掘時には燃料や電力消費以外にも環境負荷を発生する要因がある。原油採掘時に発生する随伴ガスの一部は焼却処分されCO<sub>2</sub>となり大気中へ放出される。南方地域の随伴ガス油比とフレア率をそれぞれ350scf/bbl, 5.9%<sup>9)</sup>, その他の地域ではそれぞれ720scf/bbl, 6.3%<sup>9)</sup>として, フレアによるCO<sub>2</sub>排出量を推計した。他方, 粗天然ガスに含まれるCO<sub>2</sub>(表7)は液化前に分離され大気中へ放出される。粗天然ガスには硫化水素が含まれる場合もあるが, その硫黄分のほとんどは液化前に回収されるとし, 精製後の硫黄分は表3に示す値とした。なお, 石炭については, 表8に示される消耗資材の消費を考慮した。

以上の調査結果に基づいて, 各化石燃料1単位の採掘, 前処理, 現地輸送に伴う排出量 (E<sub>h</sub><sup>2</sup>) を式2に従って求めた。CとMは, それぞれ1単位あたりのエネルギー消費量と消耗資材消費量を示す。Pはフレアおよび粗ガス含有分による排出量である。kは消耗資材の種類を示す。各燃料の排出係数 (CF) は表3の値を, 各消耗資材の排出原単位 (MF) は表4の値を用いた。なお, 電力の排出係数は各国もしくは地域の電源構成を考慮して算出した表9の値を用いた。

$$E_h^2 = \sum_k C_k * CF_{hk} + \sum_k M_k * MF_{hk} + P_h$$

式2

2.4 輸送船舶の建造

各化石燃料の輸入に使用されている船舶は様々な種類があり, 推進機関や速力などは船舶ごとに異なる。これらの要因は船舶の建造および輸送に伴う排出量に影響を与える。表10に石炭, 原油, LNGの輸送に用いられる船舶の特性を地域別にまとめている。また, 輸入国から我が国までの距離は表11に示す値を用いた。

各化石燃料1単位あたりの船舶建造時における排出

表7 液化燃料量と粗天然ガス中のCO<sub>2</sub>含有率

国	液化に必要なLNG量	粗ガス中のCO <sub>2</sub> 量
	kg/t	mol%
マレーシア	95.8	3.7
ブルネイ	81.4	0.7
インドネシア	170.6	11.3
U A E	184.8	5.0
アメリカ	80.5	0.0
オーストラリア	150.0	1.0

文献<sup>11), 12)</sup>より

表8 採炭時における消耗資材消費量 単位: kg/t

	鋼材	爆薬	セメント	ゴム
露天掘り		4.0698		0.0003
坑内掘り	0.0550		0.0349	0.0001

聞き取り調査より

表9 電力の環境負荷係数

	g-CO <sub>2</sub> /kWh	g-SO <sub>2</sub> /kWh	g-NO <sub>x</sub> /kWh
アメリカ	550.2	2.14	0.94
カナダ	174.5	0.68	0.30
ロシア	781.9	2.39	0.99
中国	926.1	7.25	1.71
北朝鮮	417.3	2.12	0.57
ベトナム	201.5	1.00	0.32
インドネシア	560.8	2.74	0.78
オーストラリア	735.5	4.05	1.32
ニュージーランド	73.3	0.09	0.07
南アフリカ	647.2	3.68	1.05
コロンビア	218.6	1.71	0.28

文献<sup>8), 7), 8), 10), 11)</sup>より

量は、生産・現地輸送設備と同様に式1にしたがって求めた。船舶の自重 (G) を式3, 4に示されるように載貨重量 (W) の関数として表した。文献<sup>10)</sup>に記載のある総トン数1万トン以上の24隻の石炭輸送船, 41隻の原油タンカーを対象として回帰分析して得られた結果である。R<sup>2</sup>は石炭輸送船が0.93, 石油タンカーが0.91であり良い相関が得られている。ただし, LNG船の自重は、現在就航しているLNG船の多くが同サイズであることから、文献<sup>10)</sup>より15隻の平均値をとり30872tとした。なお、船舶の素材はすべて鉄であるとして、排出原単位は表4の値を用いている。排出比率R<sub>CO<sub>2</sub></sub>, R<sub>SO<sub>2</sub></sub>, R<sub>NO<sub>x</sub></sub>はそれぞれ0.75, 0.62, 0.41とした。なお、船舶の耐用年数は20年とした。

$$G = 5.21 W^{0.692} \text{ (石炭輸送船) 式3}$$

$$G = 5.02 W^{0.705} \text{ (原油タンカー) 式4}$$

2.5 船舶輸送

ほとんどの石炭輸送船と原油タンカーの推進機関はディーゼル機関であり、図2にしたがって石炭と原油の船舶輸送における年間燃料消費量を推計した。航海時における船舶の機関出力 (P) は載貨重量 (W) と速力 (V) との関数である<sup>15)</sup>として定式化した。出力は速力の3乗に比例する<sup>15)</sup>として回帰分析を実施した結果、式5, 6が得られた。R<sup>2</sup>は石炭輸送船が0.93, 石油タンカーが0.91であり良い相関が得られている。他方、燃料消費量 (C) は出力に比例する<sup>15)</sup>として回

表11 航行距離

単位: km

	国・地域	航行距離		国・地域	航行距離
石炭	中国	2339	LNG	ブルネイ	4363
	北朝鮮	2071		U A E	11899
	インドネシア	4821		アメリカ	6047
	ベトナム	4358		オーストラリア	6793
	ロシア	1659	原油	中国	2296
	カナダ	7970		南方	5004
	アメリカ	8886		中東	12216
	コロンビア	14975		ロシア	1676
	南アフリカ	14344		アメリカ	6186
	オーストラリア	7333		中南米	12223
LNG	インドネシア	5476	アフリカ	20050	
	マレーシア	4674	オーストラリア	5626	

文献<sup>8), 9), 10), 11)</sup>より

帰分析を実施して式7, 8を得た。式6, 7の比例係数は、機関の時間あたり1馬力あたりの燃料消費量に相当する。R<sup>2</sup>は石炭輸送船が0.85, 原油タンカーが0.88とそれほど悪くはない。式5~8の導出には式3, 4と同様に文献<sup>10)</sup>のデータを用いた。なお、航行時にはC重油が用いられているとした。

石炭運搬船と原油タンカーの碇泊時における荷役以外の燃料消費はそれぞれ116.0kg/h, 444.9kg/h<sup>16)</sup>とした。荷役の燃料消費は石炭が0.95kW/h<sup>2)</sup>, 原油が0.28kg/kl<sup>16)</sup>とした。碇泊時には石炭の荷役を除いてA重油が用いられるとした。また、石炭の荷役時の電力は石炭火力によるとした。なお、中国原油と南方原油については文献<sup>9)</sup>に従いカーゴヒーティングを考慮した。

年間のCO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, 碇泊時NO<sub>x</sub>排出量は式9にしたがって求める事が出来る。CO<sub>2</sub>およびSO<sub>x</sub>排出係数は表3に示す値を用いた。NO<sub>x</sub>排出係数はディーゼル補機と補助ボイラーとでそれぞれ32.7kg/kl<sup>11)</sup>, 9.3kg/kl<sup>15)</sup>とした。なお、航行時のNO<sub>x</sub>排出量については、実測データから求められた式10<sup>9)</sup>に従い船舶ごとに推計しその合計で年間排出量とした。各輸入国からの船舶輸送に伴う年間排出量を年間輸入量で除することで、化石燃料1単位あたりの排出量を各国別に明

表10 船舶特性

資源	地域	載貨重量 t	積載率	速力ノット	碇泊h/往復
石炭	北米, アフリカ	112000	100%	14.05	108
	その他	90000	100%	14.05	108
原油	中東, 中南米, アフリカ,	250000	100%	14.90	72
	南方, 露, 米, 大洋州,	100000	100%	15.10	48
	中国	80000	96%	15.10	48
LNG	全地域	67720	96%	19.30	48

聞き取り調査と文献<sup>8), 9), 11)</sup>より

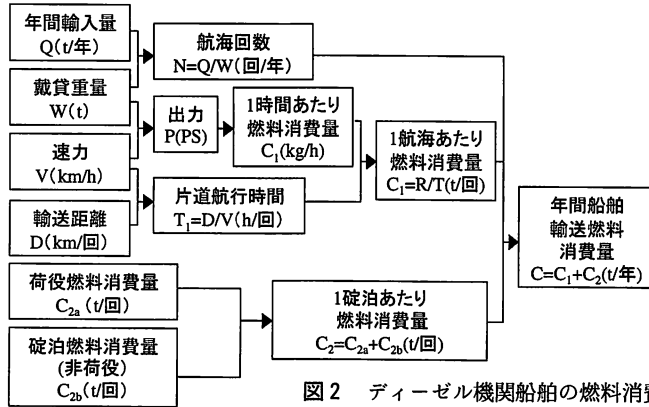


図2 ディーゼル機関船舶の燃料消費量の推計方法概略

らかにした。

$$P = 0.0280 W^{0.443} * V^3 \text{ (石炭輸送船) 式5}$$

$$P = 0.0321 W^{0.431} * V^3 \text{ (原油タンカー) 式6}$$

$$C = 0.131P \text{ (石炭輸送船) 式7}$$

$$C = 0.133P \text{ (原油タンカー) 式8}$$

$$E_{CO_2} (SO_2, NO_2) = TC * CF_{CO_2} (SO_2, NO_2) \text{ 式9}$$

$$E_{NO_2} = 25.1 * P^{0.125} \text{ 式10}$$

LNG船については、図3にしたがって燃料消費量を推計した。LNG船の推進機関は一部ディーゼル機関によるものも在るが、ボイルオフガス（BOG）を燃料とする蒸気タービンがほとんどである。現在航行しているLNG船の多くはBOGをすべて燃料として消費されるように設計されており、燃料消費量はボイルオフ率（BOR）に依存しているといえる。BORを減らそうという試みも存在するが、就航中のLNGタンカーのBORは1日あたり0.25%前後のものが多い<sup>16)</sup>。一方、載貨体積は1975年以降に竣工されたものの多くは125,000 m<sup>3</sup>程度である。それゆえに、LNG船はすべてBOR

が0.25%/日、載貨体積が125,000m<sup>3</sup>であると仮定して航行時の燃料消費量を推計した。なお、碇泊時の荷役以外の燃料消費は805.6kg/h<sup>16)</sup>、荷役の燃料消費は0.13kg/t<sup>17)</sup>とした。碇泊時の燃料はLNGとした。以上の条件の基にディーゼル機関船舶と同様に化石燃料1単位あたりの排出量を各国別に明らかにした。その際に用いたCO<sub>2</sub> およびSO<sub>x</sub>排出係数は表3の値であり、NO<sub>x</sub>排出係数は8g/kg<sup>18)</sup>である。

### 3. 化石燃料の国内での燃焼に伴う排出量の推計

#### 3.1 CO<sub>2</sub>排出量

輸入された化石燃料はそのまま燃焼される場合もあるが、コークスや重油などに転換された後に燃焼される場合もある。しかし、最終的に排出されるCO<sub>2</sub>の合計量は、最初に含まれていた炭素分に依存する。したがって、国内でエネルギーとして消費する際の熱量あたりのCO<sub>2</sub>排出量は各化石燃料のCO<sub>2</sub>排出係数に等し

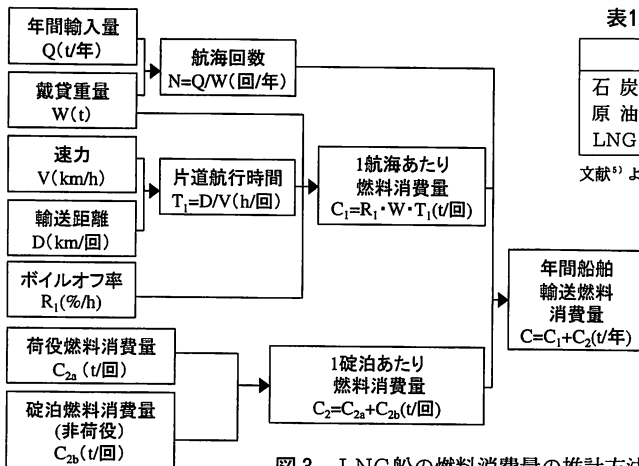


図3 LNG船の燃料消費量の推計方法概略

表12 石炭、原油、LNGの熱量あたりの排出量

	kg-CO <sub>2</sub> /Gcal	g-SO <sub>2</sub> /Gcal	g-NO <sub>x</sub> /Gcal
石炭	370.20	120.71	322.51
原油	294.18	524.82	1043.72
LNG	206.76	2.10	98.72

文献<sup>9)</sup>より

いといた(表12)。ただし、石炭については原料炭と一般炭の輸入熱量による加重平均値とした。なお、表12に示した排出量には燃焼設備建設に伴う排出量は含まれていない。このことはSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>も同様である。

### 3.2 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出量

我が国では脱硫および脱硝装置が普及しており、燃料中に含まれる全ての硫黄および窒素がそれぞれSO<sub>x</sub>およびNO<sub>x</sub>として大気中へ排出されるとは限らない。また、NO<sub>x</sub>は空気中の窒素からも生じるため排出量は燃焼条件に大きく依存する。それゆえに、文献<sup>5)</sup>に記載されている各燃料の燃焼に伴う1年間の排出量を消費熱量で割ることによって熱量あたり排出量の国内平均値を算出している。ただし、文献<sup>5)</sup>では、消費ベースの燃料区分で排出量と消費熱量が示されているので、石炭系、原油系、LNG系に集約した。なお、都市ガスは石炭系とLNG系にまたがるため、都市ガス製造に投入された原料炭とLNGの総熱量で配分した。このようにして得られた熱量あたりの国内平均排出量を表12に示している。

## 4. 推計結果と考察

### 4.1 化石燃料の生産および輸送に伴う排出量

第2章で述べた方法とデータに基づいて、石炭、原油、LNGの生産および輸送に伴う1t(kl)あたりのCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出量を輸入国別に推計した。表13は、その輸入国別排出量を各国の輸入量で加重平均した値をプロセス別に示している。また、固有単位だけではなく熱量あたりの排出量も示している。石炭、原油、天然ガスの発熱量をそれぞれ6,200Mcal/t、9,250Mcal/kl、13,000Mcal/tとして換算した。

設備建設時の排出量はほとんどが全体の1~5%と運用時のそれに比べて非常に小さい。LNGにおいては、運用時のSO<sub>x</sub>排出量が極めて小さいため相対的に設備建設時の排出量が大きな割合を占めている。

運用時の排出量は各化石燃料の特徴が大きく出ている。熱量あたりCO<sub>2</sub>排出量はLNGが47.63kg-CO<sub>2</sub>/Gcalと石炭や原油の4~5倍である。この主因は液化に伴う多量のエネルギー消費にある。加えて、粗ガス中のCO<sub>2</sub>放出も2割以上を占めている。また、LNGは比較的近距离の国から輸入しているにもかかわらず、石炭や原油に比べて輸送時の排出量が多い。これは、推進機関の違いと高速力による燃料多消費に起因する。石炭は輸送に伴う排出量が多く全体の65%を占めている。また、石炭生産時に排出されるCO<sub>2</sub>の大

半は電力および軽油消費に起因している。原油は、石炭とは逆に生産時の排出が全体の58%と大きい。原油は随伴ガスのフレアによる影響も大きく、随伴ガスの一層の有効利用が排出量を低減させる可能性をもっている。

SO<sub>x</sub>については、天然ガス中に硫黄分がほとんど含まれないため、LNGの排出量が極めて少ないのが特徴的である。ただし、一部のLNG船はディーゼル機関を利用しているが本推計ではすべて蒸気タービン機関と仮定しており、今回の排出量はやや過少評価されている。石炭では、海上輸送に伴う排出量が全体の71%と大きな割合を占め、生産時のそれは18%である。逆に、原油では、生産時の排出量が全体の64%を占めており、CO<sub>2</sub>と同様フレアによる影響も大きい。

NO<sub>x</sub>については輸送の影響が大きい。特に石炭と原油では全体の9割ほどを占めている。これは、石炭と原油がディーゼル機関の船舶もしくは鉄道によって輸送されているためである。LNGタンカーはBOGを燃料とする蒸気タービン機関の利用を仮定しているため、NO<sub>x</sub>排出量は原油や石炭に比べて少ない。他方、生産時の排出量はLNGが21.51g-NO<sub>x</sub>/Gcalと最も大きい。天然ガスのNO<sub>x</sub>排出係数は小さいが、液化に必要な燃料が多いため排出量は大きい。

なお、表13では合計値を示しているが、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>による環境影響は排出場所により大きく異なるため、その解釈には注意が必要である。

### 4.2 国内化石燃料の消費による国内外での排出量

表14は各化石燃料の国内外における熱量あたりCO<sub>2</sub>排出量を表している。国外での排出量は陸上付近と陸上から離れた遠方海上で排出された分にわけて示している。遠方海上は碇泊を除いた航海時の排出量であり、陸上付近はそれ以外のすべての排出量としている。平均は、3種の化石燃料の輸入熱量による加重平均値である。表15と表16は同様にSO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>排出量を示している。

表14~16で示されるように、化石燃料消費によるCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>総排出量に対する国外分の比率はそれぞれ5%、17%、14%である。SO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>はCO<sub>2</sub>に比べ国外で誘発される排出量の割合が高い。ただし、SO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>は排出場所により環境影響が異なるため、環境影響を評価する場合には地域特性を考慮しなければならない。国外で誘発されるCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>のうち、それぞれ27%、45%、77%が遠方海上で排出されている。特にNO<sub>x</sub>に関しては船舶による輸送時の

影響が非常に大きいことがわかる。いずれにしろ、国内の化石燃料消費によって無視できない量のCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>が国外で誘発されていることがわかる。我が国は化石燃料だけでなく、鉄鉱石やアルミなども輸入に大きく頼っている。それらも含め、今後、輸入

財の国内消費に伴って誘発される海外での環境影響物質の排出について、我が国が如何に対応していくかを議論していく必要がある。

一方、各化石燃料の特徴をみると、いずれの環境影響物質でも熱量あたりの総排出量はLNGが最も少な

表13 化石燃料の国外における生産および輸送に伴う排出量

化石燃料	プロセス	CO <sub>2</sub> 排出量			SO <sub>2</sub> 排出量			NO <sub>x</sub> 排出量		
		kg-CO <sub>2</sub> /t(kl)	kg-CO <sub>2</sub> /Gcal	4.6%	g-SO <sub>2</sub> /t(kl)	g-SO <sub>2</sub> /Gcal	1.3%	g-NO <sub>x</sub> /t(kl)	g-NO <sub>x</sub> /Gcal	0.8%
石炭 (t) 6200 Mcal/t	設備	3.56	0.54	4.6%	5.91	0.95	1.3%	9.70	1.56	0.8%
	採掘・選炭	22.56	3.64	30.8%	78.90	12.73	18.0%	94.71	15.28	7.6%
	(堅油)	9.95	1.60	13.6%	25.03	4.04	5.7%	72.78	11.74	5.8%
	(電力)	8.97	1.45	12.2%	49.91	8.05	11.4%	15.43	2.49	1.2%
	鉄道輸送	17.48	2.82	23.9%	43.97	7.09	10.0%	290.81	46.90	23.3%
	船舶輸送	29.83	4.81	40.7%	309.91	49.99	70.6%	851.88	137.40	68.3%
	航海	28.46	4.59	38.9%	305.06	49.20	69.5%	847.30	136.66	67.9%
	碇泊	1.37	0.22	1.9%	4.85	0.78	1.1%	4.58	0.74	0.4%
合計	73.24	11.81	100.0%	438.69	70.76	100.0%	1247.10	201.15	100.0%	
原油 (kl) 9250 Mcal/kl	設備	2.53	0.27	3.2%	4.55	0.49	0.5%	8.83	0.95	0.9%
	採掘・前処理	26.67	2.88	34.2%	308.72	33.37	36.6%	94.28	10.19	9.4%
	フレア	18.88	2.04	24.2%	233.38	25.23	27.6%	8.15	0.88	0.8%
	船舶輸送	29.94	3.24	38.4%	297.47	32.16	35.2%	888.38	96.04	88.9%
	航海	26.88	2.91	34.5%	288.11	31.15	34.1%	852.60	92.17	85.3%
	碇泊	3.06	0.33	3.9%	9.36	1.01	1.1%	35.78	3.87	3.6%
合計	78.03	8.44	100.0%	844.11	91.26	100.0%	999.64	108.07	100.0%	
LNG (t) 13000 Mcal/t	設備	6.67	0.51	1.1%	12.58	0.97	94.4%	26.17	2.01	4.3%
	採掘・液化	366.13	28.16	59.1%	0.39	0.03	2.9%	279.61	21.51	46.3%
	粗ガス	145.61	11.20	23.5%	—	—	—	—	—	—
	船舶輸送	100.81	7.75	16.3%	0.35	0.03	2.6%	297.52	22.89	49.3%
	航海	98.36	7.57	15.9%	0.34	0.03	2.6%	292.76	22.52	48.5%
	碇泊	2.45	0.19	0.4%	0.01	0.00	0.1%	4.76	0.37	0.8%
合計	619.22	47.63	100.0%	13.32	1.02	100.0%	603.29	46.41	100.0%	

表14 国内外での熱量あたりCO<sub>2</sub>排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/Gcal)

	石炭		原油		LNG		平均	
国内	370.2	96.9%	294.2	97.2%	206.8	81.3%	297.6	95.1%
国外	11.8	3.1%	8.4	2.8%	47.6	18.7%	15.3	4.9%
遠方海上	4.6	1.2%	2.9	1.0%	7.6	3.0%	4.0	1.3%
陸上付近	7.2	1.9%	5.5	1.8%	40.1	15.7%	11.3	3.6%
合計	382.0	100.0%	302.6	100.0%	254.4	100.0%	312.9	100.0%

表15 国内外での熱量あたりCO<sub>2</sub>排出量 (kg-SO<sub>2</sub>/Gcal)

	石炭		原油		LNG		平均	
国内	120.7	63.0%	524.8	85.2%	2.1	67.2%	351.9	82.9%
国外	70.8	37.0%	91.3	14.8%	1.0	32.8%	72.5	17.1%
遠方海上	49.2	25.7%	31.1	5.1%	0.0	0.8%	30.3	7.1%
陸上付近	21.6	11.3%	60.1	9.8%	1.0	32.0%	42.2	9.9%
合計	191.5	100.0%	616.1	100.0%	3.1	100.0%	424.4	100.0%

表16 国内外での熱量あたりNO<sub>x</sub>排出量 (kg-NO<sub>x</sub>/Gcal)

	石炭		原油		LNG		平均	
国内	322.5	61.6%	1043.7	90.6%	98.7	68.0%	733.2	86.0%
国外	201.1	38.4%	108.1	9.4%	46.4	32.0%	119.4	14.0%
遠方海上	136.7	26.1%	92.2	8.0%	22.5	15.5%	91.3	10.7%
陸上付近	64.5	12.3%	15.9	1.4%	23.9	16.5%	28.1	3.3%
合計	523.7	100.0%	1151.8	100.0%	145.1	100.0%	852.6	100.0%

い。しかし、国外でのCO<sub>2</sub>排出量はLNGが48.4kg-CO<sub>2</sub>/Gcalと最も高い。石炭と原油はともに国外でのCO<sub>2</sub>排出量はそれほど大きくなく全体の3%程度に過ぎない。ただし、石炭はSO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>排出量の4割近くを国外で排出している。特に、環境影響が大きいと考えられる陸上付近でのNO<sub>x</sub>排出量が64.9g-NO<sub>x</sub>/Gcalと最も多いことが特徴的である。原油は国外でのSO<sub>x</sub>およびNO<sub>x</sub>の排出比率は石炭ほどは高くない。これは、石油製品として船舶や自動車などの輸送機関で消費される際の排出量が大いいためである。しかし、国外の陸上付近でのSO<sub>x</sub>排出量は60.1g-SO<sub>2</sub>/Gcalと最も高く全体の10%を占めていることが注目される。

現在、国内でのCO<sub>2</sub>排出量の削減方策としてLNGへの燃料転換が注目されている。今回の分析結果からもLNGへの転換はライフサイクルでも消費熱量あたりのCO<sub>2</sub>排出量を削減できることが認められる。しかし、我が国におけるLNG転換は海外での排出量の増加につながる。例えば、原油からLNGへシフトした場合、国内では87kg-CO<sub>2</sub>/Gcalの削減ができる一方で、海外では40kg-CO<sub>2</sub>/Gcalの増加が生じる。つまり、国内での減少分の半分近くは海外へ移転されていると捉えることも可能である。なお、SO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>に関しては、燃料転換による効果はCO<sub>2</sub>ほど単純でなく、燃焼条件や脱硫・脱硝装置の有無の変化も考慮しなければならない。今後、国内の排出削減のために燃料転換を考える場合、海外での排出量の変化についても考慮する必要がある。

## 5. おわりに

本研究では、第一に、生産活動に必要な不可欠な石炭、原油、天然ガスの生産および輸送に伴うCO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>排出量を明らかにした。船舶輸送時の排出量については、実績を基礎にモデル化することで、速力や載貨重量などの船舶の特徴を反映した排出量の推計を可能にしている。他方、生産時の排出量は海外の代表的な値を用いており、坑井や炭田の特徴および生産技術の違いは一部を除き反映されていない。今後一層のデータの充実が望まれる部分である。本推計結果は完全なものではないが、様々な製品のライフサイクル分

析の基礎データとしても十分有効に利用できると思われる。

第二に、これらの推計を基に国内での化石燃料消費に伴って誘発される海外での排出を定量的に明らかにした。その結果、化石燃料間の代替による国内での排出量削減が、逆に海外での排出量を増加させる場合があることが認められた。今後我が国の排出量の削減を考える場合、ライフサイクルの視点を取りいれて国外で誘発される排出量に対しても考慮する必要があることを示唆している。

## 参考文献

- 1) 内山洋司, 山本博巳 (1992) 「発電プラントの温暖化影響分析」電力中央研究所研究報告Y91005
- 2) エネルギー総合工学研究所 (1990) 「火力発電所大気影響評価技術実証調査報告書」
- 3) 産産大臣官房調査統計部編 (1997) 「平成8年エネルギー生産需給統計年報」
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1994) 「地球環境からみた総合的化石燃料サイクル分析評価手法の調査」
- 5) 本藤祐樹, 外岡豊, 内山洋司 (1998) 「産業連関表を用いた我が国の生産活動に伴う環境負荷の実態分析」電力中央研究所研究報告Y97017
- 6) 本藤祐樹, 内山洋司 (1997) 「超々臨界圧微粉炭火力の導入によるCO<sub>2</sub>削減効果-社会基盤技術の環境性評価手法の開発-」電力経済研究No.38
- 7) 資源エネルギー庁新エネルギー部監修(1998) 「コールノート」
- 8) 「1998年度版石炭年鑑」(1997) テックスレポート
- 9) 船石油産業活性化センター (1998) 「輸送段階を含めた石油製品のライフサイクルインベントリーの作成に関する調査報告書」
- 10) EDMC編 (1998) 「エネルギー経済統計要覧」
- 11) 環境庁大気保全局大気規制課編 (1995) 「窒素酸化物総量規制マニュアル」公害研究対策センター
- 12) Coal Industry Advisory Group, IEA (1994) "Global methane and the coal industry"
- 13) 燃料協会編 (1984) 「燃料便覧」
- 14) 海上保安庁 (1995) 「距離表」書誌第405号
- 15) 池田宗雄 (1997) 「船舶知識のABC」成山堂書店
- 16) 船日本海運集会所 (1998) 「日本船舶明細書」
- 17) 日本タンカー協会 (1987) 「LNG海上輸送に関する調査報告書」
- 18) シップアンドオーシャン財団 (1992) 「船舶排ガスの環境への影響と防止技術の調査報告書」
- 19) 運輸省運輸政策局情報管理部編 (1997) 「平成9年版運輸関係エネルギー要覧」