船舶用燃料油中硫黄分規制強化の グローバル硫黄サイクルへの寄与度と精製エネルギー増*

平岡克英** 亀山道弘**

Contribution of Regulation Lowering Sulphur Contents in Marine Fuel Oils
to Biogeochemical Cycling of Sulphur and its Influence on Refinery Energy Consumption

By Katsuhide HIRAOKA, Michihiro KAMEYAMA

The IMO is reviewing the MARPOL 73/78 Convention ANNEX VI to reduce SO_x emissions from ships, and to lower the sulphur content in marine fuel oils. This paper estimates the proportion of SO_x emissions from world shipping in the biogeochemical sulphur cycling. Also it discusses the situation of supply and demand of elemental sulphur and the increase in refinery energy due to desulphurization of marine fuel oils.

SO_x emissions from shipping worldwide are estimated at 4.54 Tg per annum as of elemental sulphur. This accounts for 6.1% of anthropogenic emissions and 8.7% of natural emissions over the land to the atmosphere. The average sulphur content in marine fuel oils at the moment is 2.7% according to the IMO, and if it was reduced to 0.9% (as low as that of diesel oil), then SO_x emissions from shipping would be reduced to 3.4% of the natural emissions over the land to the atmosphere. The elemental sulphur desulphurized from marine fuel oils would amount to 2.8 Tg per annum. However, this should find ways to be utilized under the present situation of supply and demand of sulphur. Refinery energy would increase - due to desulphurization - by as much as 6% of the heating value of fuel oils. This implies that it is necessary to further improve transportation efficiency and avoid a carbon dioxide emission increase.

1. はじめに

船舶からの大気汚染防止のために MARPOL73/78 条約 附属書VIが 2005 年に発効し、大気汚染物質の排出が規制されている。硫黄酸化物(SO_x)の排出については、使用する燃料油の硫黄分濃度で規制されており、一般海域で使用する燃料油の硫黄分濃度は 4.5%以下、SO_x 排出規制海域(SECA)では 1.5%以下である。

しかし、最近の自動車用燃料の「サルファーフリー化」の例に見られるように陸上の規制に比較すると附属書VIの規制は緩やかな規制である。そのため船舶起因の SO_x による陸上環境への影響が相対的に大きいのではないかという懸念がある。例えば、欧州において各国の当面の SO_x 排出基準である 2010 年排出枠¹⁾は概ね満たされている状況²⁾であるが、欧州域内で補油される船用燃料油の硫黄分が EU15 カ国の排出枠の半分以上に達するとの試算に基づき、船用燃料油の硫黄分の低減化制度が研究されている³⁾。

このような中で国際海事機構(IMO)では BLG11/5 会合(2006 年 11 月)において船用燃料油の硫黄分の

規制強化が議題⁴⁾となり、検討が継続されている。因みに規制案の中で最も厳しいものでは、留出油の使用を義務化し、その硫黄分濃度は 2010~2012 年に 1%以下、2015 年に 0.5%以下とするものである。

人間活動によって大気中に放出される SO_x は人間の健康被害あるいは酸性雨による湖沼の酸性化や森林破壊といった地域的な環境被害を引き起こす。世界の海洋を航行する外航船にあっても沿岸地域の航行は一定程度あり地域的な影響を及ぼす。地域的な環境保全の観点からは船用燃料油の硫黄分規制強化の方向性は受け入れるべきものであろう。そこで本稿では船用燃料油の硫黄分規制強化について次の 3 つの観点から調査、検討した。

まず、大気中に放出される硫黄化合物は人間活動によるものに加えて生物活動や火山活動など自然に放出されるものがある。これら大気中に放出される硫黄化合物は、硫黄元素としてみれば地圏、大気圏、水圏を地球化学的に循環している。そこで本稿では船舶起因の硫黄がこの地球化学的な硫黄循環量に対してどの程度寄与しているのか、船用燃料油の硫黄分規制強化によってそれがどの程度低減されるのか、を見積もることとし、石油統計など文献に基づき調査した。

*原稿受付 平成 20 年 1 月 31 日

**正会員 (独)海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)

次に脱硫した硫黄の処理に関する調査である。石油精製の工程で油分から分離される硫黄は元素硫黄として回収されている。回収硫黄は石油精製の副産物であり、肥料製造や化学工業など多くの用途がある。船用燃料油の硫黄分規制強化によって回収硫黄が増大することになるが、それが元素硫黄の需給バランスにどの程度影響するのかを見積もった。

最後に船用燃料油を低硫黄化する際に消費されるエネルギーに関する検討である。低硫黄化は後で述べるように残渣油の直接脱硫によって対応する可能性が高い。また残渣油には原油の硫黄が濃縮された形で含まれており、しかも脱硫反応条件が厳しく、軽質油からの硫黄分離に比較してより多くのエネルギーを必要とする。従って硫黄分規制強化によってSOx排出量は低減されるが製造に伴うエネルギー消費の増大によりCO₂排出量の増加が避けられないと考えられる。これは地球温暖化防止に関連する問題でもある。本稿では船用燃料油の硫黄分規制強化により脱硫するためのエネルギー消費がどの程度増加するかを検討した。

以下ではこれらの調査結果を報告する。

2. 硫黄のグローバルサイクルと
船用燃料中硫黄の寄与度

2.1 硫黄の地球化学的循環量

硫黄化合物は大気中では気体、エアロゾル、雲・雨
水滴中に溶けた状態で存在する。その主な化学形態⁵⁾

表1 大気中に存在する硫黄化合物

酸化数	気体	エアロゾル	雲・降水
+6	SO ₃	H ₂ SO ₄ HSO ₄ ⁻ NH ₄ HSO ₄ (NH ₄) ₂ SO ₄	SO ₄ ²⁻
+4	SO ₂	H ₂ SO ₃ HSO ₃ ⁻ CH ₃ SO ₃ H	H ₂ SO ₃ HSO ₃ ⁻ SO ₃ ²⁻ 他
0	—	S	(CH ₃) ₂ SO
-2	H ₂ S CS ₂ DMS COS 他	—	—

を表1に示す。硫黄は生物にとって必要不可欠な元素であり、生物活動により大気中に放出される硫黄化合物はH₂Sなどガス状還元態のものが主体である。火山活動あるいは人間活動によって大気中に放出される硫黄化合物の主体はガス状SO₂である。以上のガス状硫黄化合物は大気中で比較的短時間に酸化され、還元態のものはSO₂になり、SO₂はさらに硫酸・硫酸塩などに酸化・化学変化し、エアロゾル態で大気中に滞留するか、降雨水として大気中から除去される。大気中の滞留時間はエアロゾルとしては1週間程度であるがガス状のものはその1/10程度と短い⁵⁾。従って大気中に放出された硫黄化合物は比較的短時間の内に地表・海洋上に戻ってくるものと考えられる。

表2に大気中を循環する硫黄化合物の主な形態とその循環速度を示す。これはP. Brimblecombeら⁶⁾による循環速度(硫黄に換算した年間循環量Tg、Tg-S/yと表す)で、人間活動による硫黄放出量は1980年代の見

図1 地球上における硫黄存在量および循環速度 (1980年代)

積りである。また、図1に地圏、大気圏、水圏それぞれに現存する硫黄量とそれぞれの間の循環速度をまとめて模式図で示す。なお図1の循環速度は表2とB. Bolinら⁷⁾の循環速度を併せて示したものである。

表2の自然循環速度の見積もり量はかなり幅のある数値であるが、陸域大気圏への自然放出量の間値は火山活動の1/2を陸域放出量に算入すると52 Tg-S/y (Mt-S/y)である。これに対して人間活動由来の放出量93 Tg-S/yは約1.8倍である。地表および海洋表面から大気圏へ流入する硫黄量の合計は342 Tg-S/yであり、大気圏現存量4.8 Tg-Sの約70倍の循環速度である。因みにCの循環⁸⁾と比較してみると、総一次生産(GPP: 陸上植生の光合成活動によるCO₂吸収)が120 Tt-C/yであるのに対して化石燃料消費による大気放出は6.4 Tt-C/yで約1/20である。Cの循環に比較してSの循環には人間活動由来Sの影響度合が非常に大きい。

S. J. Smithら⁹⁾によって1850年～2000年の人間活動による大気圏への硫黄放出量変遷が見積もられている。1980年～2000年の変遷を抜粋して図2に示す。図2にはBrimblecombeら⁶⁾による硫黄放出量(1980年)と、環境データベースEDGAR FT2000¹⁰⁾による硫黄放出量(2000年)の見積もりを比較のために示しているが、これらはS. J. Smithらの放出量より約20%多い。硫黄放出量の内訳を見ると石炭および石油の燃焼によるものが多く、非鉄金属の精錬がそれに続く。硫黄放出量合計および石炭、石油からの硫黄放出量は1980年から2000年にかけて低減しているが、外航船は増大しており、その放出割合が3.6%から6.6%に増大している。

EDGAR FT2000の硫黄放出量は緯度1度×経度1度のセル毎に提示されている。これにもとづけば人間活動由来の全放出量75 Tg-S/yの内、約90%は北半球(北緯0～70度)で放出されている。北緯0～70度の陸地面積は全陸地面積の65%であるが、上述した陸域大気圏への自然放出量が面積に比例すると仮定すると、自然放出量は33.8 Tg-S/yになり、北半球での人間活動由来S放出量67.5 Tg-S/yは自然放出量の2倍になる。

2.2 世界の船用燃料消費量と含有硫黄量の推定

世界の船舶からの大気汚染物質の排出量については、外航船についていくつか報告されている。それらは船腹統計と船の活動量から燃料消費量および大気汚染物質を算出する方法(O. Endersenら¹¹⁾, V. Eyringら¹²⁾)と燃料消費統計から算出する方法(S. J. Smithら⁹⁾, EDGAR FT2000¹⁰⁾)に分かれる。本稿では、外航船に加えて内航船から排出される硫黄量を算出するため、IEAの石油統計¹³⁾に基づくことにした。

IEAの統計はOECDについては石油製品毎・消費分野別の統計データがあるが、世界全体については主要石

表2 大気圏における主な硫黄循環の形態、循環硫黄化合物および循環速度

硫黄循環形態	硫黄化合物	循環速度 Tg-S/y (範囲)
人間活動(燃焼・精錬)	SO ₂ , SO ₄ ²⁻	93 (79-107)
火山活動	SO ₂	20 (10-30)
土壌・粉塵	SO ₄ ²⁻	20 (10-30)
陸域・生物活動	DMS, COS, CS ₂	22 (6.4-37.6)
沿岸・生物活動	H ₂ S, DMS 他	5 (1-9)
海洋・生物活動	H ₂ S, DMS 他	38 (22.1-53.9)
海塩飛沫	SO ₄ ²⁻	144 (77-203)
陸域・降水	SO ₄ ²⁻ 他	51 (38-64)
陸域・乾性落下	SO ₄ ²⁻	16 (5-47)
陸域・吸収	SO ₂	17 (7-27)
海洋・降水	SO ₄ ²⁻ 他	230 (160-300)
海洋・乾性落下	SO ₄ ²⁻	17 (3-48)
海洋・吸収	SO ₂	11 (5-17)

図2 人間活動による大気圏への硫黄排出量の変遷

油製品の統計になる。そこでOECDにおける船舶によるFuel oil (C 重油相当)とGas/Diesel oil (軽油・A 重油相当)の消費量それぞれに主要石油製品カテゴリ(Heavy fuel oilとMiddle distillates)のOECDと世界の需要比を乗じて世界の船用燃料油消費量とした。平均硫黄含有率の設定は、Fuel oilはIMOの調査結果により2.7%とし、Gas/Diesel oilは堤ら¹⁴⁾の補油資料では年平均値が0.8%～1.0%の範囲に分布しているので、その中間値0.9%を代表値とした。

表3に船用燃料油消費量および硫黄含有量の推定値および2001年の世界の石油需要を示す。なお世界石油需要の欄に示す硫黄含有量は石油製品に残留する硫黄量の推定値である(表4参照)。世界の船用燃料油消費量は、世界の石油需要の5.4%を占める。また、石油需要に占める重油需要の割合が約15%であること¹³⁾を考慮すると、船用燃料油消費量は重油需要の約1/3を占めることになる。

船用燃料油の硫黄含有量は 4.54 Tg-S であり、人間活動由来放出量 (EDGAR FT2000) の 6.1%、陸域大気圏への自然放出量の 8.7%に相当する。燃料種別でみると Fuel oil が 92%を占め、内航・外航で区分すれば、外航船によるものが 86%を占める。Fuel oil の硫黄含有率を 2.7%から Gas/Diesel oil 並の 0.9%に低下させると仮定すれば船用燃料油消費により放出される硫黄量は約 61%削減され、陸域大気圏自然放出量の 3.4%に低減する。なお、外航船による硫黄排出量の推定値 (3.9 Tg-S) は S. J. Smith ら (4.1 Tg-S) および EDGAR FT2000 (3.6 Tg-S) の硫黄排出量と同等である。

EDGAR FT2000 を分析すると船舶からの硫黄排出量は

表 3 世界の船用燃料油消費量と硫黄含有量の推定

	燃料消費量			燃料中の硫黄含有量			
	OECD		World	硫黄分		OECD	World
	Mton	Mton	%	%	Tg-S	Tg-S	%
Int'l Marine	78.8	163.2	4.5%	—	1.83	3.91	86%
Gas/Diesel oil	15.8	27.5	—	0.9%	0.14	0.25	—
Fuel oil	63.0	135.7	—	2.7%	1.69	3.66	—
Dom. Marine	16.4	32.1	0.9%	—	0.31	0.63	14%
Gas/Diesel oil	7.7	13.4	—	0.9%	0.07	0.12	—
Fuel oil	8.7	18.7	—	2.7%	0.24	0.51	—
Marine Total	95.2	195.3	5.4%	—	2.14	4.54	100%
Gas/Diesel oil	23.5	40.9	—	0.9%	0.21	0.37	8%
Fuel oil	71.7	154.4	—	2.7%	1.93	4.17	92%
世界石油需要	—	3,594	100%	—	—	27.3	—

人間活動由来 S 放出量と同様に約 90%が北半球で放出されている。従って北半球においては船舶からの硫黄排出量は人間活動由来 S 放出量の 6.1%に相当し、自然放出量に対する割合は 12%となる。

3. 回収硫黄の需給バランス

図 3 に石油製品製造工程のモデルフロー¹⁵⁾を示す。このモデルは石油産業活性化センターによる日本の石油製品の LCI (ライフサイクルインベントリ) 解析に使用されたものである。各石油製品のうちナフサ、灯油、軽油などの軽質留分は水素化精製によって、重油は水素化脱硫によってその品質が高められている。各水素化精製・脱硫工程で油中の硫黄分は硫化水素として分離され、さらに硫化水素は部分酸化反応行程を経て元素硫黄として回収される。

回収されるべき硫黄を原油がどの程度含有しているかであるが、原油の硫黄含有率は油種により多様で、しかもその生産統計の入手も容易ではない。そこで本稿では以下のように推定した。

原油の性状例 (77 例)¹⁶⁾から世界各地域の平均含有率を算出し、表 4 に示すように設定した。さらに各

図 3 石油製品製造行程のモデルフロー

地域の石油生産量を BP (英国石油) の石油統計 (2001 年) ¹⁷⁾ を基に算出 (表 4 参照) し、硫黄含有量を推定した。硫黄含有量は 44.2Tg-S となり、原油の平均硫黄含有率は 1.2% 程度である。世界の回収硫黄生産量 (2001 年) は 16.9Tg-S ¹⁸⁾ なので硫黄回収率は 38.2% と推定される。因みに日本の輸入原油の場合は平均硫黄含有率 1.4%、硫黄回収率は 66% であり ¹⁹⁾、脱硫設備の設置率の高さがうかがえる。

元素硫黄の生産は石油からの回収だけではなく天然ガスからの回収硫黄、鉱物硫黄などがある。図 4 に世界の元素硫黄の生産量 (2002 年) とその内訳および用途を示す ²⁰⁾。生産量は天然ガスからが最も多く、鉱物硫黄の生産は減少傾向にある。元素硫黄の用途は様々であるが硫酸製造用が大部分を占める。一方、元素硫黄はすでに余剰状態にあり、2000 年以降 3 年間の平均では約 2Mt/y (Tg-S/y) の生産過剰状態である ²⁰⁾。硫黄 2Mt は VLCC の積載容積で換算すると 3.3 隻に相当する。大量の余剰硫黄の処理についてカナダの例 ²¹⁾ をみると、幅数 100m、高さ約 30m の大ブロックとして野積しているが、その局地的な環境影響および健康被害が懸念されている。

硫酸の製造には、元素硫黄の他、硫化鉱あるいは非鉄金属製錬時に排出される SO_2 が利用される。硫酸の生産量と内訳および用途を同じく図 4 に示す ²⁰⁾。元素硫黄からの生産量が主体であるが、非鉄金属製錬からの生産量も大きい。

硫酸の用途は肥料用途が主たるものであるが、その他無機薬品、合成繊維、石膏など様々な用途に利用される。元素硫黄の生産過剰状態の理由は、環境対策の結果として非鉄金属製錬からの硫酸生産増や合繊生産時の副産物である硫安の生産増による硫酸の需要減などによっている。消費した硫酸は、肥料となったものは散布後に溶出し、工業用に使用されたものは中和されて、最終的には図 1 に示したように海に流れていくと考えられる。

船舶燃料油の硫黄分規制強化によって回収硫黄が増大する。例えば表 3 に示した船舶燃料の Fuel oil を Gas/Diesel oil 並の硫黄含有率、すなわち 2.7% から 0.9% に下げるとすれば 2.8Mt/y の余剰硫黄が生産される。これは体積に換算すると VLCC 4.6 隻分に相当する。船舶燃料油の硫黄分規制強化には、大気環境が改善される一方で、ポリウムのある廃棄物をいかに安全に処分するかという問題が背景にある。

4. 脱硫のためのエネルギー消費量

船舶燃料油などの高硫黄重油は減圧残油を主体とし、留出軽油や直接脱硫重油などと調合されて製造されて

表 4 石油の硫黄平均含有率, 2001 年生産量および硫黄含有量の推定

地域	S含有率	石油生産量		硫黄含有量	
	%	Mton	%	Tg-S	%
中東	2.00	1,103	30.7	22.0	49.8
中南米	2.33	516	14.4	12.0	27.2
北米	0.89	475	13.2	4.2	9.6
ロシア	0.67	425	11.8	2.8	6.4
北欧	0.27	322	9.0	0.9	2.0
アフリカ	0.30	375	10.4	1.1	2.5
中国	0.48	165	4.6	0.8	1.8
東南アジア	0.18	181	5.0	0.3	0.7
豪州	0.02	32	0.9	0.01	0.01
世界合計	—	3,594	100	44.2	100
回収硫黄	—	—	—	16.9	38.2

図 4 世界の元素硫黄と硫酸の生産量・用途内訳

いる (図 3 参照)。また、船舶燃料は 2.2 で述べたように世界の重油需要の 1/3 を占めており、減圧残油の主要用途と考えられる。一方、重油の石油需要に占める割合 ¹³⁾ が 1980 年頃の約 30% から 2002~2004 年の約 15% と半減していることに見られるように世界の石油需要は軽質化の傾向にある。このような状況を考慮すると低硫黄船舶燃料を供給するためには、軽質油の調合割合増ではなく、減圧残油の直接脱硫によって対応する必要性が高いと考えられる。そこで本稿では減圧残油の直接脱硫によって低硫黄船舶燃料を供給するものと仮定し、船舶燃料低硫黄化に要するエネルギー消費量を推定する。

図 5 に減圧残油の水素化分解・脱硫行程の入出力モデルおよび脱硫エネルギー原単位を示す。減圧残油の硫黄含有率 4.5%、脱硫率 85% および水素投入量 230Nm³/kL の設定は水素化分解法の一つである LC-フアイニング法のデータ ²²⁾ に基づいている。反応用に投入されるエネルギーについては図 3 に示した常圧残油と減圧残油の水素化脱硫行程の LCI 解析結果 ¹⁵⁾ を適用した。なお、水素投入量は図 3 に示した水素化脱硫行程の場合の 1.25 倍である。

水素製造行程の入出力モデル ¹⁵⁾ およびエネルギー原単位を図 6 に示す。原料は、ナフサ、LPG が主であるが、これらの入力量を低位発熱量 (LHV) で換算して

図5 水素化分解脱硫エネルギー原単位

図6 水素製造エネルギー原単位

水素製造エネルギー原単位を示した。

減圧残油の脱硫エネルギー原単位は除去する硫黄 1kg あたり 140MJ である。Fuel Oil の硫黄含有率を 2.7% から 0.9% に脱硫により低下させると仮定すると、燃料 1t あたり 2.53GJ の脱硫エネルギーを必要とし、これは Fuel Oil の LHV 発熱量 41MJ/kg で換算すると Fuel Oil 61.6kg の発熱量に相当する。すなわち脱硫することにより燃料消費率が 6% 増大することと等価である。従って船舶からの SO_x 排出量を削減すると同時に、CO₂ 排出増を避けるためには、さらなる輸送効率向上が求められる。

5. まとめ

IMO において船舶燃料油の硫黄分規制強化が検討されていることに関連し、船舶起因 SO_x の地球化学的硫黄循環への寄与度およびそれに対する規制強化の効果を推定した。また、規制強化により回収硫黄が増大するがその需給バランスへの影響および脱硫に要するエネルギー消費量を推定した。

(1) 世界の船舶燃料油消費量 (2001 年) は、世界の石油需要の 5.4% を占め、その含有硫黄量は 4.54 Tg-S/y である。この硫黄量は人間活動由来硫黄放出量の 6.1%、自然活動により陸域大気圏へ放出される量の 8.7% に相当する。

(2) 人間活動による硫黄放出量の約 90% は北半球で放出されている。北半球において船舶からの硫黄排出量は陸域大気圏自然放出量の 12% に相当する。

(3) 規制強化により船舶燃料油の硫黄分を Fuel Oil の平均含有率 2.7% から Gas/Diesel oil 並の 0.9% に低下させると仮定すると次のようになる。

(3.1) 船舶燃料油からの硫黄放出量は約 61% 低減され、陸域大気圏自然放出量の 3.4% に低減する。

(3.2) 規制強化により回収される元素硫黄は 2.8 Tg-S/y になり、体積に換算すると VLCC4.6 隻分に相当する。元素硫黄の需給バランスはすでに余剰状態にあるので、廃棄物としていかに安全に処分するかという

問題がある。

(3.3) 脱硫に要するエネルギーは燃料油発熱量の約 6% に相当する。これは燃料消費率が 6% 増大することと等価であり、SO_x 排出量を削減すると同時に CO₂ 排出増を避けるためには、さらなる輸送効率向上が求められる。

本研究は NEDO 受託研究「環境調和型高性能ハイブリッド熱交換器による高効率船用排熱回収システムの研究開発」により実施された。

参考文献

- 1) http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/eu27_nat_emission_ceilings_2010.pdf
- 2) http://www.eper.ec.europa.eu/eper/documents/EPER_Review_2004_version16May2007.pdf, p57
- 3) M. E. Davies et al, Study on the economic, legal, environmental and practical implications of a European Union system to reduce ship emissions of SO₂ and NO_x, http://ec.europa.eu/environment/Envenco/taxation/ship_emissions/pdf/mainfinal.pdf, p8
- 4) IMO, SUB-COMMITTEE ON BULK LIQUIDS AND GASES 11th session, Agenda item 5, BLG 11/5, 14 December 2006
- 5) 角皆静男, 山本宏, 大気中の硫黄化合物, 季刊化学総説 No. 10 「大気の化学」, 学会出版センター, 1990, pp76-87
- 6) P. Brimblecombe et al, SCOPE39 (Evolution of the Global Biogeochemical Sulphur Cycle, ed. by P. Brimblecombe and A. Yu. Lein), 1989, pp80-83, <http://www.icsu-scope.org/>, (Publications, Out of Print Titles, Download Book Chapters)
- 7) B. Bolin and P. B. Cook, SCOPE21 (The major Biogeochemical Cycles and Their Interactions), 1983, Chapter 2.5, <http://www.icsu-scope.org/>, (Publications, Out of Print Titles, Download Book Chapters)

- 8) IPCC, Climate Change 2007 –The physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter7, http://ipcc-wg1.ucar.edu/g1/Report/AR4WG1_Print_Ch07.pdf, p515
- 9) S. J. Smith et.al, http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-14537.pdf, p11
- 10) Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), http://www.mnp.nl/edgar/model/v32ft2000edgar/edgarv32ft_acid/edgv32ft-so2.jsp
- 11) O. Endersen et al, Emission from international sea transportation and environmental impact, J. of Geophysical Research, Vol. 108, No. D17, 4560, ACH14, 2003
- 12) V. Eyring et al, Emissions from international shipping: 1. The last 50 years, J. of Geophysical Research, Vol. 110, D17305, 2005
- 13) IEA Statistics, Oil Information 2006
- 14) 堤裕司, 山口智彦, 最近の燃料油の地域別性状について, 日本船用機関学会 35-2 マリンエンジニアリング月例講演会, 平成 12 年 12 月, p22
- 15) 石油産業活性化センター, 石油製品油種別 LCI 作成と石油製品環境影響評価調査報告書, PEC-1999R-13, 平成 12 年 3 月, pp33-34
- 16) 石油学会編, 新石油事典, 朝倉書店, 1982 年, pp946-955
- 17) Statistical Review of World Energy 2006, <http://www.bp.com/>, (Reports and publications, Statistical Review of World Energy 2006, Downloads, Historical data, Excel workbook)
- 18) 大蔵隆彦, 資源・素材学会, 硫酸・イオウの需要開発に関する調査研究委員会報告書, 平成 17 年 11 月, p126
- 19) 硫黄回収率は文献 15) により著者算出, 想定原油の密度と硫黄含有率 (p21) および回収硫黄割合 (pp33-34) に基づき算出.
- 20) 加藤逸郎, 資源・素材学会, 硫酸・イオウの需要開発に関する調査研究委員会報告書, 平成 17 年 11 月, p70
- 21) http://folc.ca/sulphur_storage/sulphur_blocks.htm
- 22) 石油学会編, 新石油事典, 朝倉書店, 1982 年, p288