

平成17年度

船舶からの揮発性有機化合物(VOC)の 排出影響に関する調査報告書

平成18年3月

海洋政策研究財団
(財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

はじめに

本報告書は、競艇交付金による日本財団の助成事業として平成16年度及び17年度に実施した「船舶からの揮発性有機化合物(VOC)の排出影響に関する調査」事業の成果をとりまとめたものです。

船舶の排ガス中に含まれる窒素酸化物及び硫黄酸化物の環境影響については良く知られており、かつ国際的に国際海事機関(IMO: International Maritime Organization)においてMARPOL73/78条約附属書VIが定められ、既に規制が開始されているところです。一方、原油、ガソリン、化学薬品類等の輸送中に大気に排出される揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compounds)は、悪臭物質、発ガン性等の有害物質、光化学スモッグ等の原因物質及び地球温暖化など大気環境に悪影響を及ぼす重要な物質であり、その正確な環境影響評価が求められています。特に平成17年7月に開催されたIMOの第53回海洋環境保護委員会(MEPC53: Marine Environment Protection Committee)において、附属書VIの改正検討項目に上記の窒素酸化物及び硫黄酸化物に対する規制に加えて、VOC排出削減の具体的な検討が盛り込まれました。

本事業は、当財団の過去の船舶排ガス実態調査の実績とノウハウを生かし、VOCの船舶からの排出実態の解明、排出モデル策定等の今後のVOC対策に資する総合的な調査に取り組んだものである。

本報告書が広く皆様に活用され、大気環境保全、地球温暖化対策に貢献できることを期待致しております。

なお、本事業を実施するに当たっては、芝浦工業大学学長 平田 賢氏を委員長とする「船舶からの揮発性有機化合物(VOC)の排出影響に関する調査委員会」各委員による熱心なご審議・ご検討を頂きました。また、アンケート・ヒアリング調査、実船計測調査にご協力頂いた各海運会社、荷主、オペレータ社等 関係者に対し、感謝の意を表する次第です。

平成18年3月
海洋政策研究財団
(財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

船舶からの揮発性有機化合物(VOC)の排出影響に関する調査委員会 委員名簿

(順不同、敬称略)

委員長	平田 賢	芝浦工業大学 学長
委員	近藤 明	大阪大学 大学院 工学研究科 地球総合工学系 環境工学専攻 助教授
	〃 間島 隆博	(独)海上技術安全研究所 環境・エネルギー研究領域 主任研究員
	〃 古志 秀人	石油連盟 技術環境安全部 環境・安全グループ長
	(田和 健次	石油連盟 技術環境部 技術・環境グループ長)
	〃 石崎 直温	(社)日本化学工業協会 環境安全部 部長
	〃 黒越 仁	(社)日本船主協会 海務部 係長
	〃 井崎 宣昭	日本内航海運組合総連合会 審議役
	〃 内田 成孝	全国内航タンカー海運組合 業務グループ 海工務部長
関係者	大野 敬介	国土交通省総合政策局 環境・海洋課 海洋室
	〃 梶田 智弘	国土交通省海事局 安全基準課 課長補佐
	〃 谷川 勇二	国土交通省港湾局 環境整備計画室 廃棄物対策企画官
	〃 辻 広登	国土交通省港湾局 環境整備計画室 課長補佐
	〃 山廻邊 伸充	国土交通省港湾局 環境整備計画室 海域環境係長
事務局		
	〃 工藤 栄介	海洋政策研究財団 常務理事
	〃 田上 英正	海洋政策研究財団 海技研究グループ長
	〃 佐伯 誠治	海洋政策研究財団 海技研究グループ長
	〃 三木 憲次郎	海洋政策研究財団 海技研究グループ長代理
	〃 華山 伸一	海洋政策研究財団 海技研究グループ主任研究員

()内は前任者

目 次

1.調査の概要	1
2.調査の内容	7
2.1 VOC の解説	7
2.1.1 VOC 削減の目的	7
2.1.2 VOC 削減のための処理施設名称	15
2.2 船舶からの VOC 排出実態調査	20
2.2.1 実船計測調査	22
(1) VOC ベイパー採取及び分析方法	22
(2) 実測結果	26
(a) 荷積み時における VOC 濃度	26
(b) 原油排出係数	36
(c) ケミカル排出係数	38
(d) エンジンからの排出係数	38
(e) VOC 排出係数のまとめ	39
2.2.2 VOC 排出量の算定に関する調査	43
(1) 輸送量に関する統計量	43
(a) 船型別白油輸送量に関する統計量	45
(b) 船型別ケミカル輸送量に関する統計量	47
2.2.3 輸送オペレーション	50
(1) 輸送オペレーションに関する聞き取り調査結果	50
(2) アンケート調査結果	54
(a) ベイパーリターン装置の装備状況	54
(b) ベイパーリターン作業の実施状況	54
(c) ガスフリー作業の実施状況	55
(d) ガスフリー作業の要請状況	55
(e) タンク容量に対する荷積み量の状況	55
(f) 荷役速度の状況	56
2.4 VOC 発生量に関する試算	57
2.5 船舶及び陸上からの VOC 排出に対する規制動向調査	58
2.6 船舶からの VOC 排出対策技術の動向調査	69
2.6.1 陸上における VOC 排出対策技術の紹介	69
(1) 冷却凝縮法とその適用	69
(2) 直接燃焼法とその適用	71
(3) 触媒燃焼法とその適用	73
(4) 蓄熱燃焼法とその適用	74
(5) 溶剤回収法とその適用	75
(6) 膜分離法の特徴	76

(7) 吸着法の特徴	77
2.6.3 船舶 VOC に関する排出対策技術	79
2.6.4 対策コストの試算	81
2.7 光化学シミュレーションによるベイパーガスの環境影響評価	84
2.7.1 我が国における光化学汚染状況の概観	84
(1) オゾンの汚染状況	84
(2) NMHC の汚染状況	84
(3) オゾン濃度の地域別・月別の汚染状況	88
(a) オゾン濃度の頻度分布の相違	88
(b) オゾン濃度日変化の地域間の相違	88
(c) オゾン濃度と他の汚染物質の関係	89
2.7.2 シミュレーションモデルによる船舶起源の VOC の大気環境への影響分析	95
(1) オゾン生成能に影響する因子	96
(a) 大気中に存在する NO _x の影響	96
(b) VOC 組成の違い	98
(2) 船舶起源 VOC のオゾン生成能に関する指標	99
(3) 最大増加反応性(MIR)の使用例(環境省における計算方法紹介)	101
(4) 本事業における MIR の計算方法	109
(a) 基本パターンの現状再現性	110
(b) 船舶から排出される VOC のオキシダント生成能の評価	114
(c) Carter の MIR 計算結果(個別物質の MIR からの計算値)	116
(d) 混合物質の Carter 法および船舶実態に合わせた VOC 付加時のオゾン濃度計算結果	120
(e) ガソリンの荷役に伴い発生する VOC の各種算定方法による IR 計算結果の比較	121
(f) 原油の荷役に伴い発生する VOC の各種算定方法による IR 計算結果の比較	126
(g) 船舶起源 VOC によるオゾン大気環境に対する影響評価	128
(h) 船舶起源 VOC によるオゾン大気環境に対する影響評価	129
2.8 削減シナリオ	132
3.まとめ	134
3.1 船舶起源の VOC 規制の背景	134
3.2 船舶起源の VOC 排出の実態	134
3.3 船舶起源の VOC の大気環境への影響	135
3.4 船舶起源の VOC 排出を抑制する方策のあり方	136
3.4.1 船舶側の対応	136
3.4.2 陸上側の対応	137
3.4.3 国に求められる対応	137
3.5 今後の課題	137
用語・略語集	139

1.調査の概要

船舶からの排出ガスで大気環境に影響を与える物質としては、ディーゼル機関やボイラーの排気ガス中に含まれる窒素酸化物、硫黄酸化物、二酸化炭素等が良く知られている。一方、原油、ガソリン、化学薬品類等の海上輸送・荷役中に、荷室(カーゴタンク)などから大気に排出される揮発性有機化合物(VOC : Volatile Organic Compounds)については、従来は国際的には具体的な研究検討が行われてこなかったが、最近国内外においてその影響把握の必要性が指摘されている。本事業の調査目的は、VOC の排出実態及びそれによる大気環境への影響の把握である。

VOC は、沸点が低く大気中に放出しやすい有機化合物の総称であり、メタン、エタン、プロパンといったガス状物質、トルエン、ベンゼン、キシレンといった有機溶媒の蒸発分、メルカプタンや硫化水素といった微量物質が様々な濃度で混合している。その組成及び濃度は、排出源や荷室内の荷物種によって、大きく異なる。これら VOC は、①悪臭物質、②発ガン性等の有害物質、③光化学スモッグ等の原因物質及び④地球温暖化の 4 つの観点から大気環境に悪影響を及ぼす物質であり、それぞれの影響機構やその度合いは VOC 自身の濃度だけでなくその物質組成によって大きく異なるところである。このように、その影響度合いの複雑さから定量的な評価が他のガス状物質に比較して困難であることから、我が国においては、陸上発生源についても未規制の状態が続いてきていた。しかし、平成 16 年度に大気汚染防止法の改正が行われ、陸上施設については、塗装、印刷、燃料などの貯蔵、化学工業など 6 つの排出源が規制対象に指定され、それぞれについて規模ごとに排出濃度規制などが実施されることとなった。

一方、船舶から排出される VOC は、燃料の未燃分として排ガス中に含まれるほか、液体貨物の輸送中及び荷役中に、大量に大気中に排出されることが知られている。内航、外航海運に関わらず、我が国においては、原油、重油、ガソリン類などの液体貨物を大量に海上輸送しており、オペレーションに伴い発生する VOC 排出量の現状把握及び対策実施は充分に行われてこなかった。輸送・荷役時には爆発などの安全上の観点からは十分な管理対策が実施されているが、大気環境改善を目的にした対策は必ずしも充分に行われていない。同様に、排ガス中の未燃成分についても、排出量の充分な調査と大気環境への影響の解析は充分に行われていない。

ただし、我が国においても MARPOL73/78 条約附属書VIの批准に伴う改正海洋汚染防止法において、揮発性物質放出規制港湾の指定(第十九条の二十三)が決められており、港湾において船舶からの VOC 排出を将来的に抑制するための法制度の枠組みが整備されている。現在、港湾指定の方法についても国土交通省港湾局において検討が進められているところである。

次に本事業で検討する船舶からの VOC 影響について整理してみたい。VOC の大気環境への影響は、①悪臭物質としての局所的な影響、②PRTR 物質としての移動量把握の義務化と局所的な影響、③オゾン(O₃)などオキシダント(酸性物質)の前駆体としての広域への影響、④ VOC 中に含まれるメタンによる地球温暖化の影響、などに大別され、VOC 自身の濃度や組成以外にも、影響する他の汚染物質や、影響範囲、時間スケールなどが多岐にわたっている。

①と②は、従来の大気汚染物質による汚染の延長線上にあり、排出された VOC 自身が直接人体や生態系に影響を及ぼすものである。大気環境影響を解析する方法としても、NO_x、SO_x など従来の大気汚染物質の環境影響評価において用いられる方法が準用できる。具体的には、陸上固定発生源及び自動車などの移動発生源からの排出量と船舶起源の排出量の量的比較、あるいはブルーム・パフ式を基本とした拡散移流モデルを用いた陸上生活圏に到達する際の平均的濃度と実測大気環境濃度との比較などである。一般的には、船用機関類からの VOC 排出濃度は、急激な負荷変動時やアイドリング時など超低化負荷時に未燃焼分が排出される高速自動車機関に比較して非常に低く、排ガス中に含まれる VOC の生活圏への影響は非常に小さいと言える。また、荷室からの発生についても、一部港湾において局地的に悪臭についての問題が発生しているが、全国規模での対策の必要性は小さいと考えられ、本事業ではメインの環境影響評価は行わない。

④の地球温暖化については、対流圏内のオゾンが CO₂ と同じく地球温暖化に寄与することが知られている。しかし、京都議定書における規制対象である 6 物質に、VOC それ自身はもちろん、オゾンや水蒸気などが含まれていないことから明らかなように、これらの二次生成物質が引き起こす地球温暖化機構は非常に複雑であること、発生した地域により VOC 生成量や速度など大気環境中での挙動が大きく異なることから平均的な地球温暖化係数(Global Warming Potential)が算出できないことなど、その評価は非常に困難である。また、原油移動に伴い一部メタンの放出がありこれは地球温暖化に寄与するが、地球規模のメタン排出量については過去の調査において排出総量を把握している。このため、地球温暖化に対する影響は本調査の対象とはしない。

一方、③に関連したオキシダント生成については、従来とは別の手法を用いた評価が必要である。なお、オキシダントは大気中酸性物質の総称であるが、光化学反応により生じるオキシダントはオゾン(O₃)を代表物質として問題がないと言われている。

例えば、我が国の光化学物質の大気環境基準は、オキシダント濃度として規定されており、従来はガス状の酸性物質総量を湿式自動測定器により測定していた。しかし、平成 8 年 10 月、これに替えてオゾンのみを測定する乾式自動測定器による測定に変更されており、オキシダント濃度ではなくオゾン濃度で管理・規定されるようになった経緯がある。環境省は、公定法変更時の通達において、「我が国において湿式の総酸性物質として測定されるオキシダント濃度は、乾式測定法で測定されるオゾン濃度でそのおよそ 97～98 %が説明できる」としている。

VOC は既に述べたように、複数の物質の総称であるため、例えばプロダクトタンカーが運搬するガソリンから蒸発した VOC 1 kg と、塗装工場において用いられたシンナーから発生する VOC 1 kg に含まれる化学物質組成は大きく異なる。このため、オゾン生成に及ぼす影響は、VOC 組成により一定ではない。また、大気中の光化学反応では、環境中の VOC 濃度と NO_x 濃度(VOC/NO_x 比)が、生成されるオゾン量に大きく影響することが知られている。例えば、NO_x のうち NO が過剰に存在した場合(VOC/NO_x 比が小さい)、生成されたオゾンが直ちに余剰 NO と反応することで、オゾンの大気濃度は上昇しない。また、NO_x が非常に少ない場合は、光化学反応が進まず同じくオゾンの大気濃度が上昇しない。つまり、オゾン大気濃度を

最大ならしめる VOC/NOx 比があると言われている。同比率を規定する NOx 濃度・VOC 濃度それ自身も、排出量の変化、気象条件、オゾン生成反応による消費により、大きな日変化を引き起こす。

つまり、同じガソリン荷役中に発生した 1 kg の VOC も、京浜港など既に大気汚染が進んでおり陸上 VOC 排出源の影響の大きい汚染地域と、周辺に他の排出源が少なく外洋の清浄な大気の影響が大きい後背地域では、全く異なった反応挙動を示し、最終的に環境中に存在するオゾン量が大きく異なる可能性がある。

船舶起源の VOC によるオゾン生成量を正確に評価するためには、従来用いられる拡散モデルでは不十分であり、光化学反応を組み込むとともに時系列の濃度変化を連続的に評価できるモデルを使用することが必要であり、VOC、NOx 排出源の地理的な条件、気象条件、物質組成などの組み込みや、5 分ごとに前の時間ステップの濃度に基づく連続濃度予測を含む複雑なモデル開発が必要である。

大気汚染防止法の改正において、VOC 規制の目的は、③オキシダント生成の抑制に、主眼が置かれている。これは、法律内で、揮発性有機化合物を「浮遊粒子状物質及びオキシダントの生成の原因とならない物質として政令で定める物質を除く。」としていることにも現れている。また、実際の大气環境を概観しても、有害大気汚染物質であるベンゼンの環境基準の全国達成率が近年大きく改善されているのに対して、オキシダント濃度(実質的には前述したようにオゾン濃度)の環境基準の全国達成率が 0.2 %しかないことをみても全国的に対策に取り組む際の優先順位が③のオキシダント生成であると考えられる。

また、船舶からの VOC 排出場所が、例えば化学工業プラントや高速道路など他の主な排出源に比較して生活圏から離れていることから、①及び②に関する影響はごく一部の地域に限定されると考えられる。

本調査では、VOC の環境への影響として特に③に着目し、その評価に必要なモデルを開発し、地域ごとのオゾン生成量を推定すること、及び対策コストについて評価を行った。

本調査の全体の調査フローを図 1 に示す。

主な実施内容

平成 16 年度

1 船舶からの VOC 排出実態調査

船舶運航に伴う VOC の発生源としては、機関からの排出と原油及びガソリン、ケミカルの輸送プロセスに伴う大気への放出の二つに大別される。後者の液体燃料輸送プロセスに伴う VOC の排出は、積荷航海時、移入作業(タンカーからの揚げ荷時)、バラスト航海時(空き荷航海時)、移出作業(タンカーへの積み荷時)、の 4 つのフェーズに分解できる。

各過程から発生する VOC 排出量を算定するために、排出実態と排出濃度の把握を行う。このため、文献調査、ヒアリング及びアンケート、実船測定を行った。

1.1 排出実態把握のためのタンカーオペレータに対する実態調査

上記オペレーションの詳細を把握するため、以下の項目についてヒアリング調査及びアンケート調査を実施した。

1.2 実船測定

原油及びガソリン等を運搬する内航タンカーを対象に、カーゴタンク内及びベントポストから排出ガスに含まれる VOC を実測し、濃度の時間変化、組成などについて情報を収集した。

1.3 船舶からの VOC 排出モデル策定

1.1 と 1.2 で得られた排出実態をとりまとめ、オペレーションごとに VOC 排出モデルを作成する。オペレーションの進行により大幅に変化する VOC 排出濃度や排出ガス量の時間的変動を平均化し、荷種ごとの貨物取り扱い当たりののべ排出量(g-VOC/Cargo-t)のようにマクロな指標として整理した。

2 船舶及び陸上からの VOC 排出に対する対策動向調査

文献調査などにより船舶及び陸上からの VOC 対策に関する情報を収集整理した。対象は、主に燃料と化学物質の輸送及び貯蔵工程に対する VOC 対策とした。

3 船舶からの VOC 排出対策技術の動向調査

文献などより、船舶からの VOC 排出対策の動向について情報を収集整理した。

平成 17 年度

1 船舶からの VOC 排出モデル策定

1.1 排出モデルの作成

初年度に作成された 1 燃料取り扱い量当たりの排出係数を用い、汚染域、後背地域、航路帯の 3 箇所が発生する VOC が推定可能な排出モデルを作成した。平成 16 年度に推定された荷役時の排出係数は、既知のものより小さくなっている。その理由として海上ガスフリーの効果の可能性が考えられた。つまり、従来荷役時に排出されていた VOC が、現在のオペレーションにおいては、ガスフリー時に海上で発生していると解釈できる可能性もあるため、今回の排出モデルには、海上ガスフリーによる排出も含むモデルを構築した。

1.2 排出モデルを用いた船舶起源の VOC 排出量の推定

1.1 で作成した排出モデル及び統計値などを用い、船舶(主にタンカー)からの VOC が発生すると予測される汚染域、後背地域、航路帯の 3 地域において、一日に発生する VOC 総量、組成、時間変動に関するプロファイルを得た。

2 光化学シミュレーションによるベイパーガスの環境影響評価

2.1 シミュレーションモデルによる船舶起源の VOC の大気環境への影響分析

船舶起源の VOC が、我が国のオゾンの大気環境へ及ぼす影響を、光化学反応モデルを用いて評価することを目的とした。また、ここでは VOC のうち比較的高濃度で排出される荷役に伴う VOC 排出量に対して、米国 EPA で開発された光学反応モデルを用いたワンボックスモデルを用いることで、最大オゾン生成能力(MIR; Maximum Incremental Reactivity VOC1 kg が排出された際に大気中で生成されるオゾンの最大生成量 kg)を算定した。

さらに、対象地点について各地点のバックグラウンドオゾン濃度、VOC 排出量、NOx 排出量などから、特徴ある 3 地域を選定し、各地域における特徴を把握しながら環境影響の評価を行った。

3 船舶からの各モードにおける VOC 排出対策の検討

3.1 VOC 排出対策の抽出

排出削減技術に基づき、汚染域、後背地域、航路帯の 3 地域において、それぞれ実現可能な排出対策を抽出する。削減率などの削減効果、実用化レベルなど技術的な検討を行い、3 地点における最適と考えられる排出対策をまとめる。

3.2 対策コストの試算

3.1 で検討された排出対策ごとに、対策コストについての試算を行う。

3.3 まとめ

以上をまとめ、船舶からの揮発性有機化合物(VOC)の排出を削減するための、提言をまとめた。

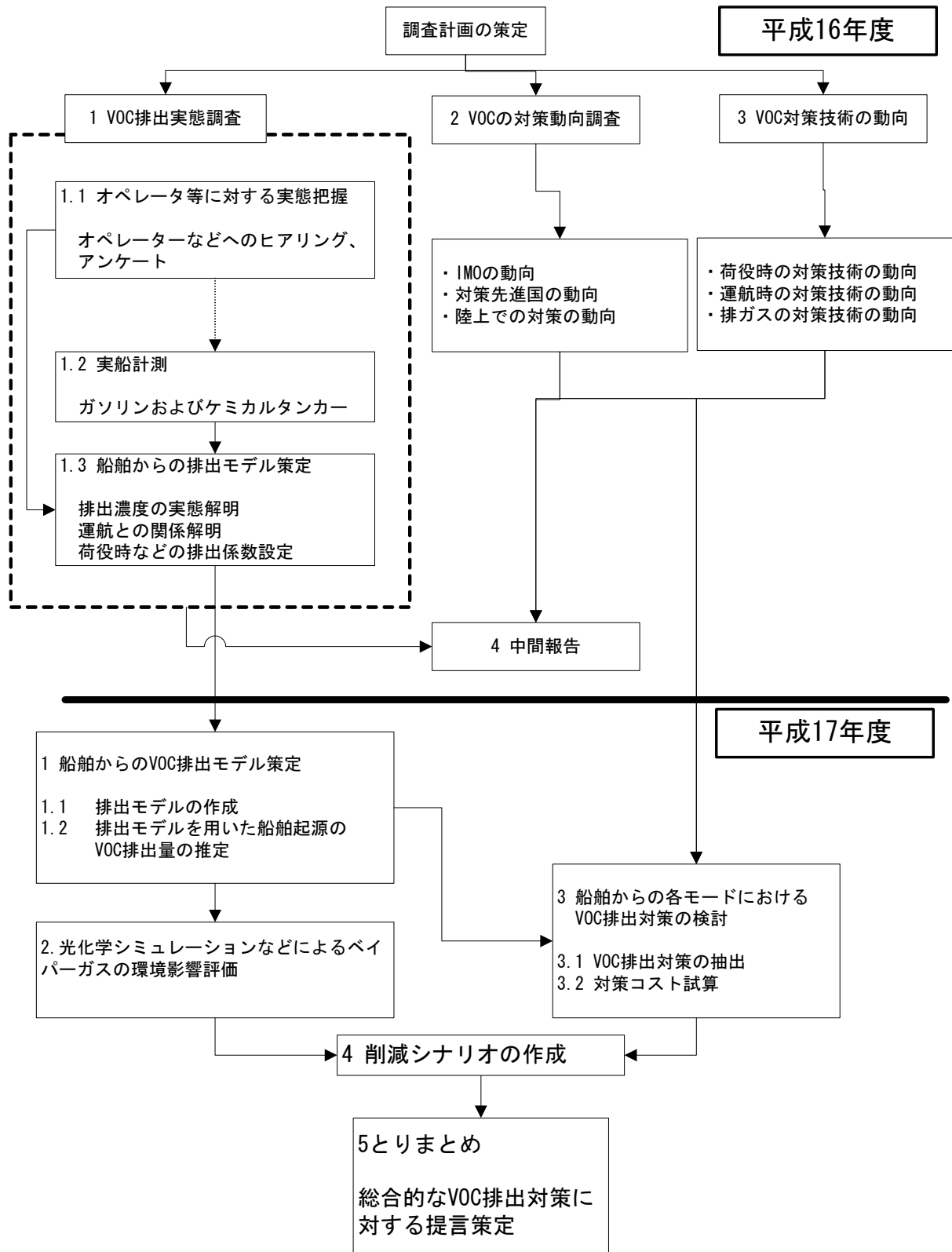


図 1 本事業の調査フロー

2.調査の内容

2.1 VOC の解説

VOC(Volatile Organic Compounds)は、① 悪臭物質としての局所的な影響、② ベンゼン、トルエン、キシレンなど有害大気汚染物質などによる局地的な影響、③ 光化学オキシダント(Ox)などの酸性物質の前駆体としての広域への影響、④ VOC 中に含まれるメタンによる地球温暖化など、大気環境に対する影響面も非常に多岐にわたる。特に③に関連したオキシダント生成に対する間接的な影響が最近注目されており、我が国においても VOC 放出を削減することを目的とした二つの法律改正(大防法および海防法、後に詳述する)が平成 16 年に公示されている。

2.1.1 VOC 削減の目的

図 2 に陸上における VOC 排出とその規制の動向を示した。①の悪臭対策については悪臭防止法において、②の有害大気汚染物質に対しては、たとえば大気汚染防止法における特定物質としてベンゼンが、有害大気汚染物質の優先取り組み物質としてトリクロロエチレン、テトラクロロエチレンが指定されており、環境基本法により定められた大気環境基準値を達成するための排出基準値が整備されている。また、他の有害大気汚染物質に対しても PRTR 制度¹による事業者の有害大気汚染物質の自主的な削減取り組みが、それぞれ陸上排出源について既に実施されているところであり、NO_x、SO_x など既存の大気汚染物質排出量と同じく、未規制の船舶からの VOC の寄与割合が、相対的に高くなっている可能性がある。

次に③の光化学オキシダントの前駆体としての VOC について考える。図 2 の上半分に示しているようにオキシダント(≒O₃)は、NO_x と VOC の共存下で光化学反応により生成する。これまで我が国においては、両前駆体のうちそれ自身にも人体への影響があり、それに基づく環境基準値が設定されている NO_x(環境基準値は NO₂ として規定されている)の削減のみが図られており、VOC 規制より NO_x 規制が優先されてきた。しかし、2.7.1 節で紹介するように NO_x の環境基準の達成状況に比較しても光化学オキシダントの環境基準達成状況は芳しくない。

図 3 に、我が国のオキシダント環境基準の達成状況を示した。我が国のオキシダント環境基準は、1 時間値が 0.06 ppm を超えないこととされている。環境基準の 2 倍の 0.12 ppm を超える可能性が高い時に「光化学スモッグ注意報」が発令され、環境基準の 4 倍の 0.24 ppm を超える可能性が高い時には「光化学スモッグ警報」が発令される²。

¹ 1999 (平成 11) 年、「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」(化管法)により制度化された。有害性のある様々な化学物質の環境への排出量を把握することなどにより、化学物質を取り扱う事業者の自主的な化学物質の管理の改善を促進し、化学物質による環境の保全上の支障が生ずることを未然に防止することを目的として、「第一種指定化学物質」の 354 物質について、業種、従業員数、対象化学物質の年間取扱量で一定の条件に合致する事業者が、環境中への排出量及び廃棄物としての移動量についての届出を義務付けられている。

² 大気汚染防止法(第 23 条第 1 項)においては、光化学オキシダントの濃度が高くなり、被害が生ずるおそれがあるときは、都道府県知事等が注意報を発令し、報道、教育機関等を通じて、住民、工場・事業場等に対して情報の周知徹底を迅速に行うこととなっている。また、この際、光化学

図 3 でわかるように環境基準の達成状況及び注意報・警報発令回数の改善とともに経年的には改善される状況になく、特に近年は全国でも 18 年ぶりに「光化学スモッグ警報」が平成 14 年千葉県で発令されるなど、むしろ悪化の傾向にあることが懸念されているところである。注意報・警報発令回数だけでなく、大気環境濃度の年平均値も高いまま推移しており、オキシダント高濃度の現出状況が日常化している可能性を示唆している。このため、従来の大気汚染防止法及び自動車 NOx・PM 法による NOx 削減だけでは、汚染域および後背地における光化学オキシダント生成量を十分に抑えることができず、オキシダント環境濃度の減少に繋がらないことが、これまでも指摘されてきた。

また、大気中のオキシダント生成に関しては、図 4 に示すように VOC と NOx の共存下で複雑な光反応が起き、オキシダント生成後に更に酸化反応が進み、二次粒子と呼ばれる浮遊粒子状物質が生成することが知られており、このような複雑な反応系のシミュレーションの実用化とその目標値の設定が困難であることが、対策の遅れに繋がってきた面もある。

このようなオキシダント及び浮遊粒子状物質に対する総合的な対策の一環として、平成 16 年 5 月 26 日に平成 16 年法律第 53 号として改正大気汚染防止法が公布された。その主な抜粋を表 1 に示す。また、改正法に基づく大気汚染防止法施行規則の一部を改正する省令平成 17 年 6 月 10 日環境省令第 14 号に交付において、表 2 に示すようにリード蒸気圧が 20 kPa 以上の燃料を 1,000 キロリットル以上貯蔵する新設タンク(既設タンクは 2,000 キロリットル以上)を揮発性有機化合物排出施設として指定し、法に基づく届け出及び規制値(60,000 ppmC=6 %C)の遵守が求められている。

これとは別に、MARPOL 73/78 条約附属書 VI³の批准に伴う海洋汚染防止法の改正において、第十九条の二十三に「揮発性物質放出規制港湾の指定」が盛り込まれており、将来港湾において船舶からの VOC 排出を抑制する制度の枠組みが整備されている(表 4)。

同法律では、第 3 条(定義)18 項において「海洋環境保全等」を、「船舶から放出される排出ガスによる大気汚染」「に係る環境の保全」としているだけで、VOC の規制の具体的な目的についてはうたっていない。

MARPOL 73/78 条約附属書 VI は、1991 年の総会決議において大気汚染防止の必要性を決議され、新附属書として採択された経緯がある。この 1991 年の総会決議においては、その前文で必要性として 1979 年に採択された「長距離越境大気汚染条約⁴」を引いている。長距離越

オキシダントの原因物質である窒素酸化物及び炭化水素類の排出削減のため、工場・事業場等に対してはばい煙排出量の削減について、自動車の使用者に対しては運転の自主的制限について、それぞれ協力を求めることとなっている。

³ MARPOL 73/78 条約 VI 附属書の第 15 規則には、揮発性有機化合物の排出規制として以下のように規定されている。日本語訳は仮訳である。

「タンカーからの揮発性有機化合物(VOCs)の排出が、1997 年の議定書締約国の管轄下にある港湾又は係留施設において規制される場合には、IMO に対してその旨の通告を提出すること。通告には、規制されるタンカーの大きさ、規制対象荷種を含むことが必要。指定された港湾又は係留施設において蒸気排出の規制を受けるタンカーは、機関が作成した標準を考慮して主管庁が承認した蒸気収集装置を装備するものとし、貨物の荷役中、この装置を使用すること。」

⁴Convention on Long-range Trans-boundary Air Pollution。1979 年締結、1983 年発効。日本は未加盟。国連ヨーロッパ経済委員会(ECE)のもとで採択されており、EU 諸国だけでなく米国、カナダなども署名批准を行っており、大陸間を隔てた長距離輸送を想定した条約である。SOx の 30 %削減を

境大気汚染条約では 1991 年当時 VOC 削減を目的とした議定書についても作業・検討を行っており、外航船についてはその実効性を担保するために NO_x、SO_x と同じく IMO に対して条約作成を要請したと考えられる。

したがって、附属書 VI において低減を目指している VOC 影響は、長距離越境大気汚染条約が示しているように、「産業活動及びエネルギー使用に伴い発生する物質により、間接的、直接的に、人間の健康を害したり、動植物や生態系を破壊したり、財産を侵害したりするなど低減しなければいけない影響」と考えられる。VOC による悪臭や人体への直接的な有害性は越境など長距離に渡って引き起こされる可能性はごく小さい。従って、長距離越境大気汚染条約が規制対象としている VOC は、「間接的」にオキシダントや酸性物質の前駆体としての VOC であると解釈できる。従って、IMO 総会決議においても、長距離越境大気汚染条約に基づき削減を検討された VOC は、オキシダントや酸性雨の前駆体としての VOC を想定していると考えられる。

国内外の法律、条約の整備状況および我が国の大気汚染状況などを総合的に考えると、船舶からの VOC についても、基本的にはオキシダント生成を抑えることを目標として、対策の必要性などを判断することが適当であろう。

定めたヘルシンキ議定書(1985)、NO_x の削減について定めたソフィア議定書(1988)、VOC 規制議定書(1991)、SO_x の削減について定めたオスロ議定書(1994)、重金属議定書(1998)、POPs 議定書、酸性化・富栄養化・地上レベルオゾン低減議定書(1999)の 8 つの議定書により、補足・強化されてきている。

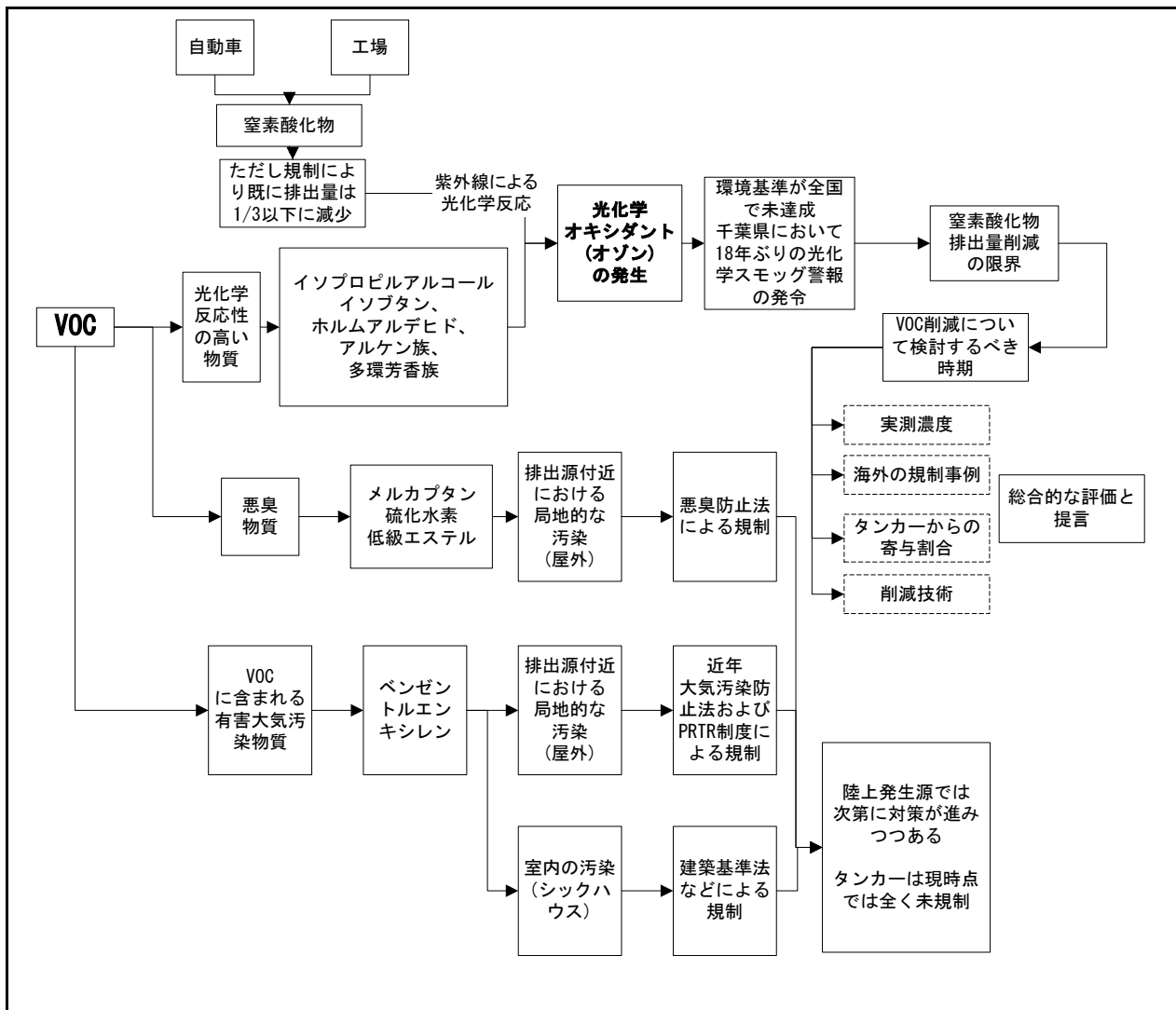


図 2 VOC 排出と健康被害の関係の概念図

○光化学オキシダント(Ox)

平成14年度の光化学オキシダントの有効測定局数のうち、環境基準達成局数は、一般局と自排局で6局(0.5%)と依然として低い水準となっている。

また、平成14年度における光化学オキシダント注意報等の発令延べ日数(都道府県単位での発令日の全国合計値)は184日であり、特に千葉県では18年ぶりに光化学オキシダント警報が発令された。濃度別の測定時間の割合で見ると、1時間値が0.06ppm以下の割合は94.5%、0.06ppmを超え0.12ppm未満の割合は5.4%、0.12ppm以上の割合は0.1%となっており、ほとんどの測定時間において環境基準値以下であった。

一方、年平均値については近年漸増している。また、大都市に限らず都市周辺部での光化学オキシダント濃度が0.12ppm以上となる日数も多くなっており、光化学大気汚染の特徴である広域的な汚染傾向が認められる。

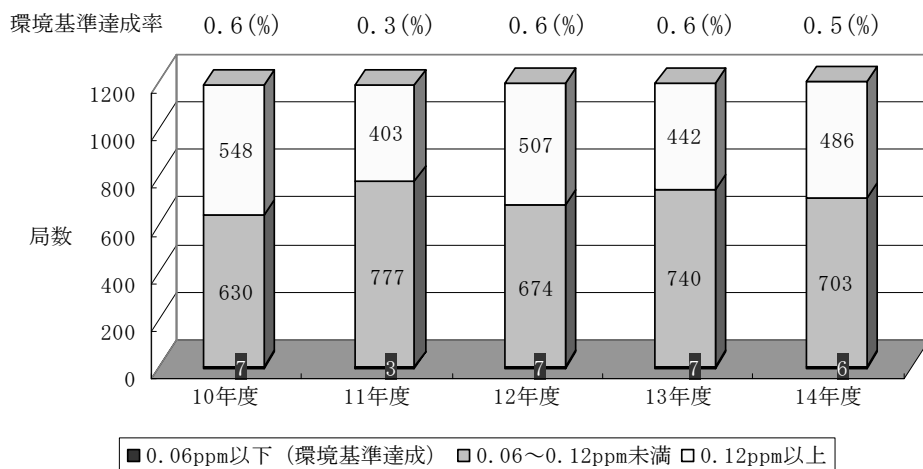


図 光化学オキシダント(1時間値の最高値)濃度レベル別測定局数の推移

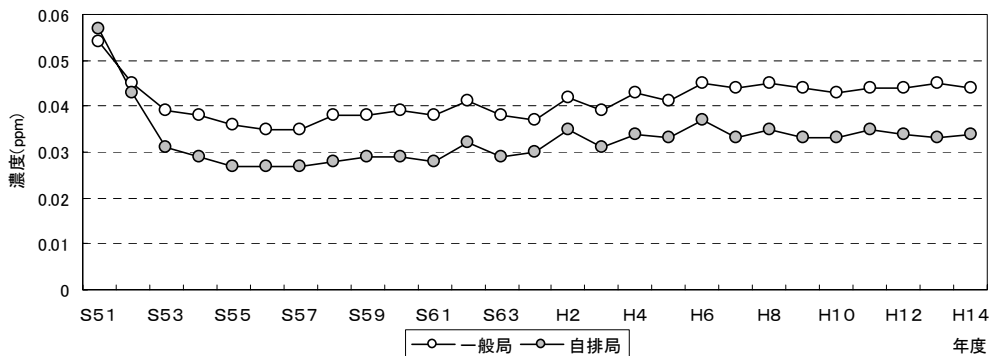


図 光化学オキシダントの昼間の日最高1時間値の年平均値の推移

図3 光化学オキシダントの環境濃度の状況

(環境省、揮発性有機化合物(VOC)の排出抑制について—検討結果—より作成)

一般局、自排局；大気汚染常時監視測定局には一般環境大気測定局と自動車排出ガス測定局の2種類があり、設置目的で分類される。一般環境大気測定局(一般局)は、環境大気の汚染状況を常時監視(24時間測定)する測定局、自動車排出ガス測定局(自排局)は、自動車排出ガスによる環境大気の汚染状況を常時監視(24時間測定)する測定局である。自排局には設置環境により、沿道局と車道局があり、車道局には環境基準が適用されない。

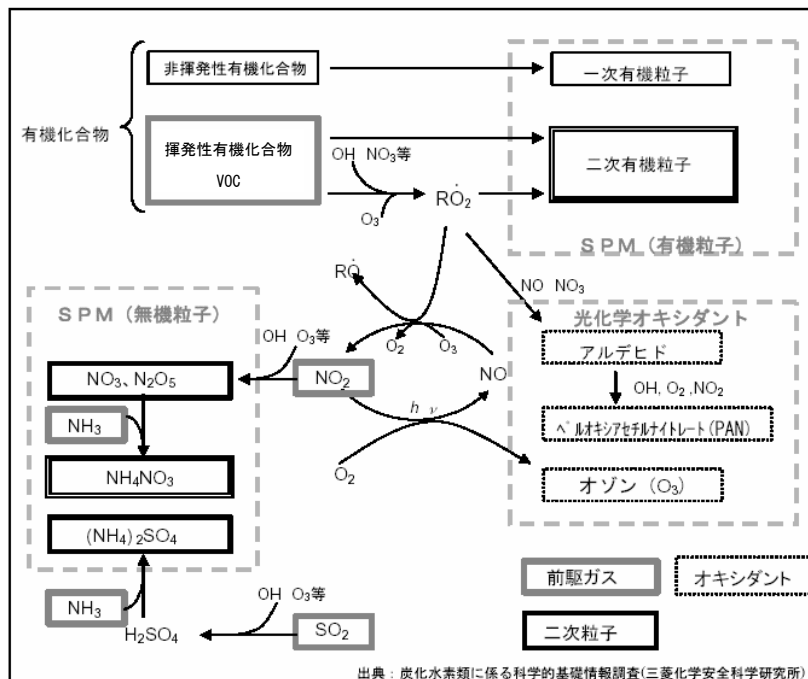
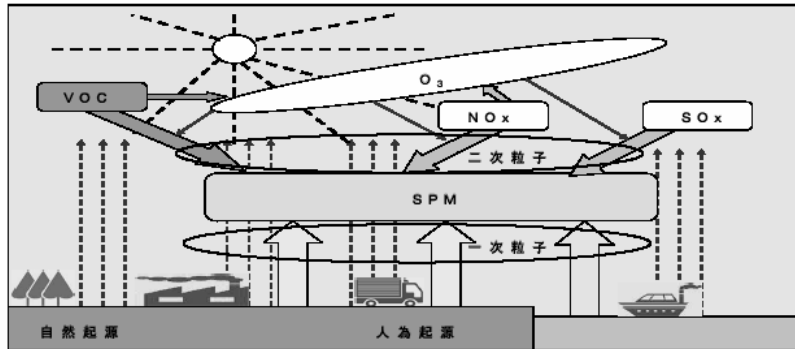
○ 揮発性有機化合物(VOC)による光化学オキシダントの生成について

揮発性有機化合物(VOC)は、光化学オキシダント及び浮遊粒子状物質(SPM)の二次生成粒子の原因物質とされている。このうち、光化学オキシダントは、大気中の VOC を含む有機化合物と窒素酸化物の混合系が、太陽光(特に紫外線)照射による反応を通じて生成する。

また、浮遊粒子状物質は、発生源から排出された時点で粒子となっている一次粒子と、排出された時点ではガス状であるが大気中における光化学反応などにより粒子化する二次粒子とに分類される。

- ・一次粒子には、工場・事業場から排出されるばいじん、粉じん、自動車等から排出される粒子状物質などがある。土壌の巻き上げ粒子や海塩粒子など自然起源のものも含まれる。
- ・二次粒子は、工場・事業場、自動車などから排出される VOC、硫黄酸化物、窒素酸化物などが原因物質となる。火山などから排出される硫黄酸化物など自然起源のものも考えられる。

なお、二次生成粒子が生成するためには、VOC から生成した反応物の蒸気圧が低い必要があるため、通常、炭素数の多い VOC が関与するが、光化学オキシダントの生成にはほとんど全ての VOC が関与する。



出典：炭化水素類に係る科学的基礎情報調査(三菱化学安全科学研究所)

図 大気中の VOC の反応を中心とした二次粒子の生成プロセス

図 4 VOC による光化学オキシダント生成機構

(環境省、揮発性有機化合物(VOC)の排出抑制について—検討結果—より作成)

表 1 VOC に関連する改正大気汚染防止法(抜粋)

平成十六年五月二十六日 法律第五十六号改正「大気汚染防止法」より作成。

第一条 目的

この法律は、工場及び事業場における事業活動並びに建築物の解体等に伴うばい煙、揮発性有機化合物及び粉じんの排出等を規制し、有害大気汚染物質対策の実施を推進し、並びに自動車排出ガスに係る許容限度を定めること等により、大気の汚染に関し、国民の健康を保護するとともに生活環境を保全し、並びに大気の汚染に関して人の健康に係る被害が生じた場合における事業者の損害賠償の責任について定めることにより、被害者の保護を図ることを目的とする。

第二条(定義など)

4 この法律において「揮発性有機化合物」とは、大気中に排出され、又は飛散した時に気体である有機化合物(浮遊粒子状物質及びオキシダントの生成の原因とならない物質として政令で定める物質を除く。)をいう。

5 この法律において「揮発性有機化合物排出施設」とは、工場又は事業場に設置される施設で揮発性有機化合物を排出するもののうち、その施設から排出される揮発性有機化合物が大気の汚染の原因となるものであつて、揮発性有機化合物の排出量が多いためにその規制を行うことが特に必要なものとして政令で定めるものをいう。

6 前項の政令は、事業者が自主的に行う揮発性有機化合物の排出及び飛散の抑制のための取組が促進されるよう十分配慮して定めるものとする。

第二章の二 揮発性有機化合物の排出の規制等

(施策等の実施の指針)

第十七条の二 揮発性有機化合物の排出及び飛散の抑制に関する施策その他の措置は、この章に規定する揮発性有機化合物の排出の規制と事業者が自主的に行う揮発性有機化合物の排出及び飛散の抑制のための取組とを適切に組み合わせて、効果的な揮発性有機化合物の排出及び飛散の抑制を図ることを旨として、実施されなければならない。

(排出基準)

第十七条の三 揮発性有機化合物に係る排出基準は、揮発性有機化合物排出施設の排出口から大気中に排出される排出物に含まれる揮発性有機化合物の量(以下「揮発性有機化合物濃度」という。)について、施設の種類及び規模ごとの許容限度として、環境省令で定める。

(揮発性有機化合物排出施設の設置の届出)

第十七条の四 揮発性有機化合物を大気中に排出する者は、揮発性有機化合物排出施設を設置しようとするときは、環境省令で定めるところにより、次の事項を都道府県知事に届け出なければならない。

- 一 氏名又は名称及び住所並びに法人にあつては、その代表者の氏名
- 二 工場又は事業場の名称及び所在地
- 三 揮発性有機化合物排出施設の種類
- 四 揮発性有機化合物排出施設の構造
- 五 揮発性有機化合物排出施設の使用の方法
- 六 揮発性有機化合物の処理の方法

2 前項の規定による届出には、揮発性有機化合物濃度及び揮発性有機化合物の排出の方法その他の環境省令で定める事項を記載した書類を添付しなければならない。

表 2 改正大気汚染防止法における燃料貯蔵施設に対する規制

大気汚染防止法施行規則の一部を改正する省令(平成 17 年 6 月 10 日環境省令第 14 号)より作成

規制対象外施設			
施設	規模		
ガソリン、原油、ナフサその他の温度 37.8 度において蒸気圧が 20 キロパスカルを超える揮発性有機化合物の貯蔵タンク(密閉式及び浮屋根式(内部浮屋根式を含む。))のものを除く。)	容量が 1,000 キロリットル以上のもの		
※ ただし、既設の貯蔵タンクは容量が 2,000 キロリットル以上のものについて排出基準を適用する。			
規制値			
施設	規模		
ガソリン、原油、ナフサその他の温度 37.8 度において蒸気圧が 20 キロパスカルを超える揮発性有機化合物の貯蔵タンク(密閉式及び浮屋根式(内部浮屋根式を含む。))のものを除く。)	60,000ppmC		
参考 (揮発性有機化合物(VOC)排出抑制対策検討会(平成 16 年度)貯蔵小委員会報告書より作成) 各種物質のリード蒸気圧(37.8℃) ケミカル貨物は 20℃における蒸気圧からの換算値			
	kPa	出典	
原油	28~40	石油産業における炭化水素ベイパー防止トータルシステム研究調査報告書	
ナフサ	60~100	石連資料	
ガソリン	44~78	JIS K2202	
ジェット燃料(JET A-1)	0.1 以下	石連資料	
灯油	0.1 以下	石連資料	
軽油	0.1 以下	石連資料	
A 重油	0.1 以下	石連資料	
ベンゼン	22.2	Chemical Safety Cards(国際化学物質安全性カード)	
トルエン	7.1		
n-ヘキサン	34.2		
アセトン	51.7		
メチルエチルケトン	22.2		
メタノール	32.0		
エタノール	16.0		
回収処理については、欧州連合(EU)の規制では、排出基準値を 35 g/m ³ と設定している。 この基準値はガソリンの場合は、概ね 54,000ppmC となる。また、米国の規制では、回収処理装置の処理効率を 95 %以上と設定している。この米国の基準は概ね EU の基準値に相当している。 これらのことから、適用可能な技術を用いた場合の排出ガス濃度は 60,000ppmC 程度まで低減可能と考えられることから、排出基準値は 60,000ppmC とすることが適当である。			

2.1.2 VOC 削減のための処理施設名称

次に、MARPOL 73/78 条約付属書VIの VOC 規制と、改正海防法における VOC 規制の用語の違いについて簡単に触れておきたい。

付属書VIでは、条約に基づき VOC 規制港湾を定める国は「蒸気排出制御装置」が、指定された港湾及び係留施設に整備されることとしている。一方、同港湾を利用し、蒸気排出の規制を受けるタンカーに対しては「主管庁が承認した蒸気収集装置を装備するものとし、貨物の荷役中、この装置を使用するものとする」としている。つまり、船舶側には VOC 収集装置(原語では *a vapour collection system*)、陸上側には VOC 排出制御装置(原語では *vapour emission control systems*)を整備すると明確に定めており、船上で収集した VOC ガスを陸上側で処理し排出量を抑えることを想定している。

一方、改正海防法では、揮発性物質放出規制港湾においては、国土交通省令で定める揮発性物質放出規制対象船舶が、揮発性物質放出防止設備を設置することを求めている。本条文だけでは、全ての船種が船舶側で処理を行うようにも読めるが、施行規則(表 5)では対象船舶をタンカーおよびケミカルタンカー、ガスカリヤーに限定すること、技術基準に関する省令(表 6)、告示(表 7)では、船舶に設置する「揮発性物質放出防止設備」は、揮発性物質移送管および液面計測装置などの安全装置から構成され、「貨物艙から揮発性有機化合物を陸上に移送することができること」とされており、条約と同じく陸上での処理を前提としている。

陸側施設の設置や使用については、第 44 条において、該当指定港湾内の港湾区域およびその周辺地域において排ガスなどが出を防止するため、必要と認められる場合は、「排出ガス処理施設」が確保できるように港湾計画を定めなければいけない、とされている。

表 3 MARPOL73/78 条約付属書VIと改正海防法の施設名の比較

	陸側の施設名	船舶側の施設名
MARPOL73/78 条約 付属書VI	VOC 排出制御装置 (<i>vapour emission control systems</i>) MSC/Circ.585 on Standards for Vapour Emission Control Systems.に安全面の規定あり	VOC 収集装置 (<i>a vapour collection system</i>) MSC/Circ.585 on Standards for Vapour Emission Control Systems.に安全面の規定あり
改正海防法	排出ガス処理施設	揮発性物質放出防止設備 改正海防施行規則および技術基準に関する省令と告示に安全面の規定あり
備考	現時点では大気放出の削減率など具体的な規制値は定められていない。	船上処理は想定していない。ベイパーリターン管を意味している。

表 4 改正海防法における VOC 放出規制に関する条文(抜粋)

平成十六年四月二十一日 法律第三十六号改正「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律⁵」より作成

第四章の二 船舶からの排出ガスの放出の規制

(揮発性物質放出規制港湾の指定)

第十九条の二十三 国土交通大臣は、揮発性有機化合物質(油、有害液体物質等その他の貨物から揮発することにより発生する有機化合物質をいう。以下同じ。)を放出する貨物の積込みの状況その他の事情から判断して揮発性有機化合物質の放出による大気汚染を防止するための措置を講ずる必要があると認められる港湾について、これを揮発性物質放出規制港湾として指定することができる。

2 国土交通大臣は、前項の規定による指定をしようとするときは、あらかじめ、当該港湾の港湾管理者の意見を聴かなければならない。

3 環境大臣は、船舶からの揮発性有機化合物質の放出の抑制を図るため必要があると認めるときは、国土交通大臣に対し、港湾を特定して、第一項の指定を求めることができる。

4 国土交通大臣は、第一項の規定による指定をしたときは、国土交通省令で定めるところにより、揮発性物質放出規制港湾の名称及びその区域を公示しなければならない。

5 第二項及び第三項の規定は、外国の港湾を指定する場合には、適用しない。

6 前各項の規定は、第一項の規定による指定の変更又は廃止について準用する。

(揮発性物質放出防止設備等)

第十九条の二十四 船舶所有者は、揮発性物質放出規制港湾において揮発性有機化合物質を放出する貨物の積込みが行われる場合には、当該船舶(その用途、総トン数、貨物の種類等の区分に応じ国土交通省令で定めるものに限る。以下「揮発性物質放出規制対象船舶」という。)に、揮発性有機化合物質の放出による大気汚染を防止するための設備(以下「揮発性物質放出防止設備」という。)を設置しなければならない。

2 前項の規定による揮発性物質放出防止設備の設置に関する技術上の基準は、国土交通省令で定める。

3 揮発性物質放出規制港湾にある揮発性物質放出規制対象船舶において揮発性有機化合物質を放出する貨物の積込みを行う者は、国土交通省令で定めるところにより、揮発性物質放出防止設備を使用しなければならない。ただし、次の各号のいずれかに該当する場合には、この限りでない。

一 揮発性物質放出規制対象船舶の安全を確保し、又は人命を救助するために必要な場合

二 揮発性物質放出規制対象船舶の損傷その他やむを得ない原因により揮発性有機化合物質が放出された場合において、引き続き揮発性有機化合物質の放出を防止するための可能な一切の措置をとったとき。

⁵ 法律名は、平成 16 年 4 月 21 日法律第 36 号により、1973 年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する 1978 年の議定書によって修正された同条約を改正する 1997 年の議定書が日本国について効力を生ずる日から、「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」に改正された。

表 5 改正海防法における船舶側 VOC 放出規制に関する条文(抜粋)

「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行規則（昭和四十六年六月二十三日運輸省令第三十八号）最終改正年月日:平成一七年六月三〇日国土交通省令第七四号」より作成

（揮発性物質放出規制港湾の指定に係る公示）

第十二条の十七の十二

法第十九条の二十三第四項（同条第六項において準用する場合を含む。）に規定する揮発性物質放出規制港湾の名称及びその区域の公示は、官報により行うものとする。

（揮発性物質放出規制対象船舶）

第十二条の十七の十三

法第十九条の二十四第一項の国土交通省令で定める船舶は、次に掲げる船舶（海上自衛隊（防衛大学校を含む。）の使用する船舶を除く。）であつて、揮発性物質放出規制港湾において揮発性有機化合物を放出する貨物の積込みを行うもののうち、貨物の積込みの状況その他の事情を勘案して告示で定めるものとする。

- 一 タンカー
- 二 有害液体物質ばら積船（技術基準省令第一条第五項に規定する有害液体物質ばら積船をいう。）
- 三 液化ガスばら積船（危険物船舶運送及び貯蔵規則（昭和三十二年運輸省令第三十号）第四百二十二条に規定する液化ガスばら積船をいう。）

（揮発性物質放出防止設備の使用方法）

第十二条の十七の十四

法第十九条の二十四第三項の規定により揮発性有機化合物を放出する貨物の積込みを行う者が揮発性物質放出防止設備を使用する場合には、次に掲げる事項を記載した操作手引書に従つて行うものとする。

- 一 揮発性物質放出防止設備の配置を示す図面
- 二 最大許容荷役速度
- 三 荷役速度に対する揮発性物質放出防止設備の最大圧力損失
- 四 通気装置（技術基準省令第四十四条に規定する通気装置をいう。）の設定圧力
- 五 揮発性物質放出防止設備の操作の方法
- 六 前各号に掲げるもののほか、揮発性物質放出防止設備の使用に関して必要な事項

（港湾における廃油処理施設等の整備計画）

第四十四条

港湾管理者は、当該港湾の港湾区域及びその周辺地域において生ずる廃油、廃有害液体物質等及び廃棄物並びに排出ガス（以下この条において「廃油等」という。）の種類及び量等に照らし、当該港湾区域及びその周辺海域において船舶又は海洋施設から廃油等が排出又は放出されることによる海洋汚染等を防止するため必要があると認めるときは、当該港湾において廃油処理施設、廃有害液体物質等処理施設及び廃棄物処理施設並びに廃棄物の処理場所並びに排出ガス処理施設（排出ガスの処理の用に供する設備の総体をいう。）が確保されるようこれらの建設又は配置について港湾法（昭和二十五年法律第二百十八号）第三条の三第一項の港湾計画その他の港湾の整備に関する計画に定めなければならない。

表 6 改正海防法における船舶側設備(揮発性物質放出防止設備)に関する技術基準(抜粋)

「海洋汚染防止設備等、海洋汚染防止緊急措置手引書等及び大気汚染防止検査対象設備に関する技術上の基準等に関する省令（昭和五十八年八月二十四日運輸省令第三十八号）最終改正年月日：平成一七年六月三〇日国土交通省令第七四号」より作成

(揮発性物質放出防止設備)

第四十四条

揮発性物質放出防止設備は、次に掲げるものにより構成されるものとする。

- 一 揮発性物質移送管
 - 二 液面計測装置
 - 三 圧力計測装置
 - 四 高位液面警報装置
 - 五 通気装置
- 2 前項第一号の揮発性物質移送管は、次に掲げる基準に適合するものでなければならない。
- 一 貨物艙から揮発性有機化合物質を陸上に移送することができること。
 - 二 陸上の配管との接続部は、荷役用マニホールドにできる限り近接して設置されていること。
 - 三 前号の接続部は、他の配管の接続部と容易に識別できるものであり、かつ、手動により確実に遮断することができる弁その他の装置を有しているものであること。
 - 四 前号の装置を操作する位置が容易に視認できるものであること。
 - 五 ドレン抜き装置を備えているものであること。
- 3 第一項第二号の液面計測装置は、次に掲げる基準に適合するものでなければならない。
- 一 揮発性有機化合物質が放出されることなく、貨物艙内の液位を測定できるものであること。
 - 二 貨物の積込みを制御することができる場所で貨物艙内の液位を監視できること。
- 4 第一項第三号の圧力計測装置は、次に掲げる基準を適合するものでなければならない。
- 一 貨物艙内のガス圧を測定できるものであること。
 - 二 貨物艙内のガス圧が所定の圧力に達したときに警報を発するものであること。
- 5 第一項第四号の高位液面警報装置は、次に掲げる基準に適合するものでなければならない。
- 一 第三項の液面計測装置から独立して作動するものであること。
 - 二 貨物艙内の液位が当該貨物艙の満載時の位置に達したときに可視可聴の警報を発し、かつ、船舶及び陸上の荷役装置の運転を停止するものであること。
- 6 第一項第五号の通気装置は、次に掲げる基準に適合するものでなければならない。
- 一 十分な排気容量を有する圧力逃し弁（貨物艙内のガス圧が加圧状態になった場合に当該貨物艙から気体を外部へ排出するための弁をいう。）を備えているものであること。
 - 二 所定の圧力において作動する負圧逃し弁（貨物艙内のガス圧が減圧状態になった場合に外部から気体を貨物艙に吸入するための弁をいう。）を備えているものであること。
- 7 前各項に規定するもののほか、揮発性物質放出防止設備の設置に関する技術上の基準の細目は、告示で定める。

表 7 改正海防法における船舶側設備(揮発性物質放出防止設備)に関する技術基準(抜粋)

○国土交通省告示第百二十号(平成十七年二月一日)より作成

海洋汚染防止設備等、海洋汚染防止緊急措置手引書等及び大気汚染防止検査対象設備に関する技術上の基準等に関する省令（昭和五十八年運輸省令第三十八号）第四十四条第七項及び第四十五条第二項の規定に基づき、大気汚染防止検査対象設備の技術上の基準を定める告示を次のように定める。

（揮発性物質放出防止設備に係る技術上の基準）

第二条技術基準省令第四十四条第七項の告示で定める揮発性物質放出防止設備の設置に関する技術上の基準の細目は、揮発性物質移送管につき、次に掲げるものとする。

一 異なる貨物タンクの蒸気であって、かつ、混合することにより危険が生ずるおそれのあるものについては、それぞれが混合されることなく移送することができるものであること。

二 船体に接地していること。

三 イナートガスを貨物タンクに供給するための管を揮発性物質移送管として使用する場合は、当該移送管は、イナートガス発生装置に揮発性物質の流入を防止するための措置が講じられているものであること。

四 通気装置の誤作動を防止するための措置が講じられているものであること。

2.2 船舶からの VOC 排出実態調査

船舶運航に伴う VOC 排出経路は、機関からの排出と原油及びガソリン、ケミカル輸送プロセス時の大気への漏えい・放出の二つに大別される。後者の液体燃料輸送プロセスに伴う VOC の排出は、積荷航海時、移入作業(タンカーからの揚げ荷時)、バラスト航海時(空き荷航海時)、移出作業(タンカーへの積み荷時)、の 4 つのモードに分解できる。各過程から発生する VOC 排出量を算定するために、排出実態と排出濃度の把握を行う。このため、文献調査、ヒアリング及びアンケート、実船計測を行った(図 5 参照)。

なお、機関からの排出(排ガス中の VOC)については、排出実態は機関の稼働率及び負荷率を用いることで推定できることから、既存文献調査による排気ガス中の VOC 濃度の情報収集整理のみとした。

作業名称	積み荷航海時	揚げ荷(移入)作業	ガスフリー作業	バラスト航海	積み荷(移出)作業	機関からの排出
VOC 排出状況	タンク内はほぼ満載である。タンク内の上部空間の圧力変化(気象や海象による温度変化や揺れに伴うもの)によりわずかに呼吸ロスが発生する	タンカーから陸上タンクへの荷揚げ作業である。カーゴタンク内の燃料を船舶側動力源により陸上へ移送する。間隙には外気が導かれる	タンク内の VOC 濃度を下げするため、電動ファンを用いてカーゴタンク内に外気を強制掃気する。爆発及び船員への暴露を考え、航海中に実施される。	タンク内の酸素濃度を下げる作業。タンク内の圧力変化によりわずかに呼吸ロスが発生する。一方、壁面及び底面にたまった残存燃料が揮発	タンカーに対する荷積み作業である。陸上側からの燃料の移入に伴い、タンク内の VOC を含んだガスが大気へと放出	主機関などで燃焼される燃料の未燃分が、煙突より排出される
タンク内と外部とのやり取り 点線は気体の流れ、太実線は液体燃料の流れ						
大気へのガス放出量	微量	無視できる	大量(タンク容量の5倍以上)	無視できる	大量(荷役量とほぼ同値である)	商船からは微量
VOC 濃度	非常に濃い	非常に濃い状態からやや希釈される	タンククリーニングを伴う場合、初期は非常に濃いですが次第に薄くなる	しだいに濃くなる。ガスフリー作業を行った場合は変化無し。	初期は薄いですが、満載時に従って非常に濃くなる。	非常に薄い
作業場所	港湾区域外	港湾内	港湾区域外	港湾区域外	港湾内	主に外洋航海中

	太線は、VOC を含んだタンク内ガスの大気放出を模擬的に示す。長さは放出量の大小を定性的に示している。
	ハッチングは、タンカーカーゴタンク内の積み荷量を模擬的に示す
	細点線は、船上で生成したイナートガス(低酸素の低反応性ガス)のカーゴタンクへの注入を模擬的に示す。長さは放出量の大小を示す。
	灰色線は、カーゴタンクから出し入れされる積み荷燃料の動きを。長さは荷役体積の大小を示す。

図 5 船舶運航に伴う VOC 排出の模式図

2.2.1 実船計測調査

主に内航プロダクトタンカーを対象に荷主、運航会社を選択し、表 8 に示す 4 隻について測定調査を実施した。

表 8 VOC 実船計測対象船舶

	総トン数	ベントポスト高(m)	タンカー種類	測定対象荷種	実施日
1,000 kl 型	328	4.53	白油タンカー	レギュラーガソリン	2004/9/16
2,000 kl 型	688	6.45	白油タンカー	プレミアムガソリン	2004/9/17-18
2,000 kl 型	749	6.5	白油タンカー	レギュラーガソリン	2004/9/22
5,000 kl 型	2,559	6.3	白油タンカー	レギュラーガソリン	2004/10/26-27

測定対象荷種は、測定対象としたカーゴタンク内の燃料種を示した。

表 9 VOC 実船計測対象船舶(ケミカルタンカー)

	総トン数	ベントポスト高(m)	タンカー種類	測定対象荷種	実施日
2,000 kl 型	328	6.52	ケミカルタンカー	トルエン	2005/3/17
2,000 kl 型	688	6.38	ケミカルタンカー	トルエン	2005/3/30

測定対象荷種は、測定対象としたカーゴタンク内の燃料種を示した。

(1) VOC ベイパー採取及び分析方法

タンカーの荷積み作業時における VOC 採取方法は図 7 に示すとおりである。ベントポストには、その大気放出部に引火防止のための金網上のフレームアレスタが取り付けられている。このフレームアレスタ表面に、ろうと状の傘を取り付けたテフロンチューブを弁とポストの排出口に設置固縛した状況を図 8 に示した。チューブなどは全て本質防爆機材とし、テフロンチューブは静電気防止のために、導電用チューブを外側に巻き、甲板上にアースして利用した。

現場で用いる FID 計は本質防爆タイプのものであるが、国内の防爆型式認定を受けていない。このため、ベントポスト直下付近の防爆地域内での測定は行わず、図 9 に示すようにテドラーバッグに手で 5 分ごとに採取後に、直ちに船橋内に持ち込み FID 計で総 HC 濃度を測定した。実際の作業状況を図 10 及び図 11 に示した。

また、同様にテフロン製チューブから手でバッグに数リットル採取持ち帰り後、ラボで成分分析(GC-FID⁶)を行った。

GC -FID 法と現場測定に用いた FID⁷計との濃度関係を図 6 に示した。n-ブタンとイソブタンの Response Factor はメーカー出荷時でそれぞれ 1.8 及び 1.9 程度あるため、現場での指示値は小さいものとなっている。以降のガソリンベイパーの VOC 濃度は、図 6 中に示した FID 測定による濃度と MS-FID による測定濃度の関係式を用いて補正したものである。なお、現

⁶ 水素イオン化検出器ガスクロマトグラフガス状の他成分を測定する代表的な方法。ガスクロマトグラフィーにより分子量などごとに、物質を分離し、その後 FID 法(下記参照)により、物質ごとの濃度を測定する。

⁷水素炎イオン化型分析計(Flame ionization detector)。水素炎中に炭化水素(HC)が導入されると複雑なイオンが生じる。炎をはさんで対向した電極を設け、その間に直流電圧を印可すれば、炭化水素の炭素数に比例した微少なイオン電流が流れるので、これを電圧に変換して測定し、全炭化水素量を測定する。

場で使用したテフロンチューブ(長さ 20 m)を用いて、n-ブタンの吸着を計測した結果、1 分後には入力濃度に対して 99 %以上の VOC 濃度がチューブ出口で観測されたため、管壁面の吸着による濃度減少は無視できると考えられる。また、今回の測定では、ベントポストから実際に大気に排出されるガス中濃度の測定を行った。荷役速度(800 kl/時間前後)から考えて、ポスト開口部からの放出速度は 4 m/sec 程度になり風の吹き込みなど周辺大気による希釈は無視できる。また、ガス量は荷役体積に基づいた計算を行っていることから、十分な精度が確保できていると考えられた。

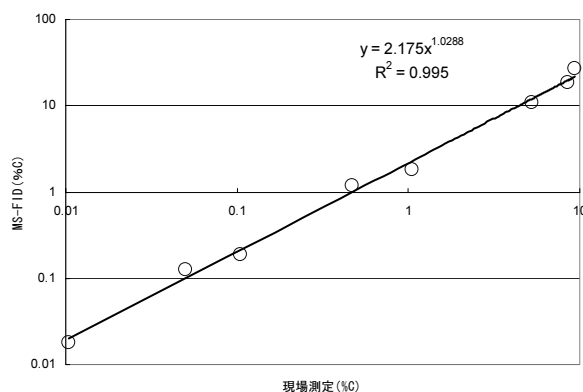


図 6 MS-FID 法と現場測定に用いた FID 計との濃度関係

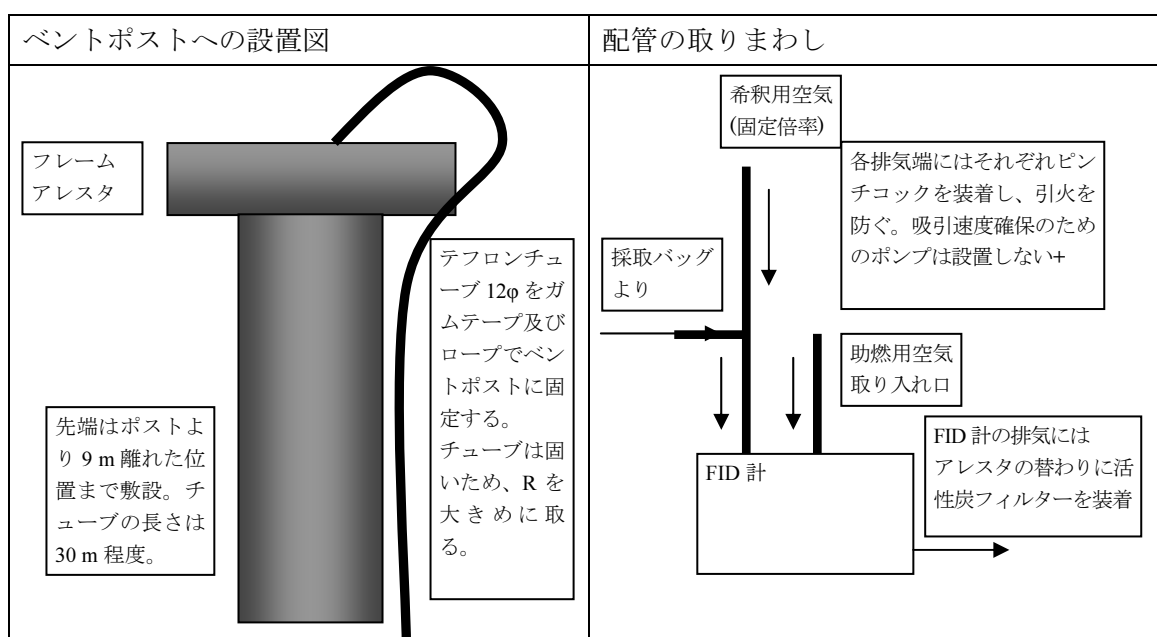


図 7 VOC ペーパーの採取及び現場における分析方法



図 8 サンプル採取状況

(ベントポストのフレームアレスタに、ろうと状の採取ポイントを固定し、テフロンチューブを甲板上まで固縛)

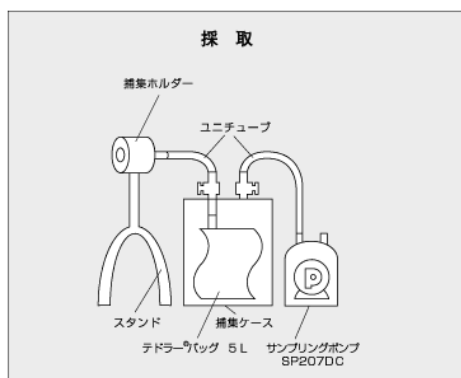


図 9 テドラーバッグを用いた採取方法

(通常は左図のように、捕集ケース内を負圧するために電動ポンプを用いるが、今回の測定では右図のような手動のシリンダーポンプを用いる)。

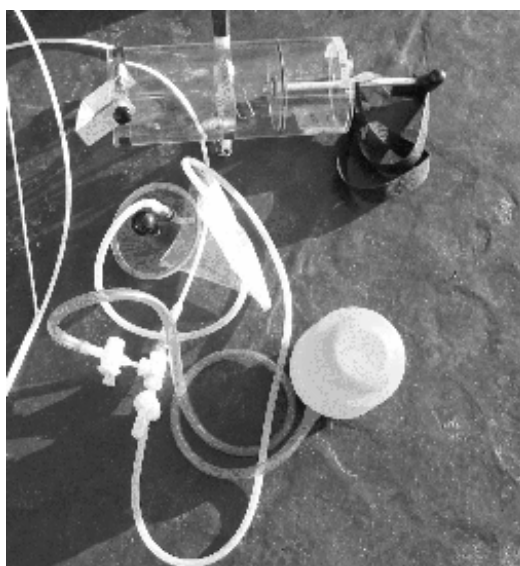


図 10 サンプル時のポンプ接続状況

(黄色の足踏みポンプはチューブ内の空気を置換するために用いる)

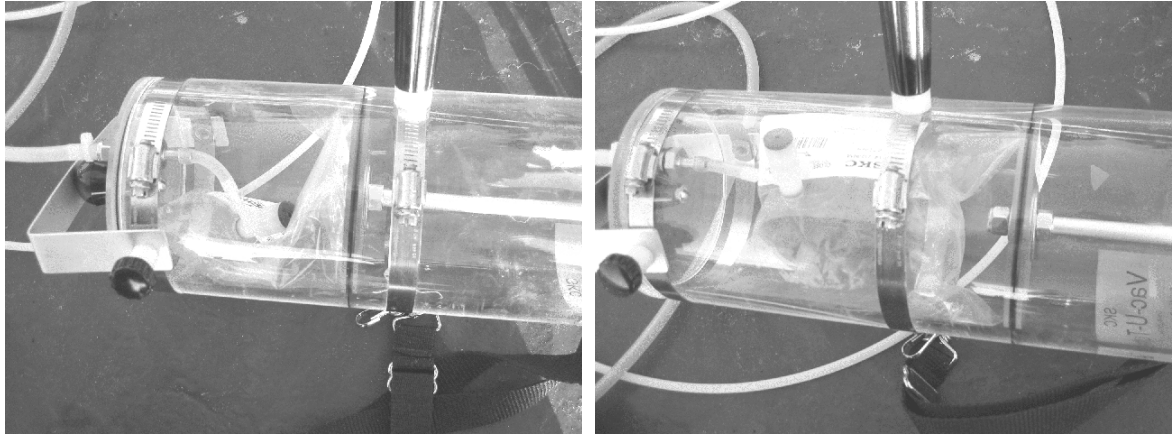


図 11 サンプル用の手動ポンプ作動状況

(右図ではシリンダーが右側に引かれているため、シリンダー内の採取バッグが膨らんでいる)

(2) 実測結果

(a) 荷積み時における VOC 濃度

(1)項において説明した方法で測定された荷積み時の VOC 濃度について図 12 から図 15 に示した。図 12 に示した 1000 kl タンカーでは、5 つある全てのカーゴタンクに同時にガソリンが注入されており、各タンク内の液面はほぼ同じ高さを示していた。このため、VOC 濃度は経時的に単純な増加を示しており、最終的には 40 %C(=400,000 ppmC)に近い値を示した。この値は、2.1 節で述べた改正大気汚染防止法における、貯蔵タンクの排出規制値 6% C(=60,000ppmC)をはるかに上回る濃度であり、カーゴタンクが満載に近くなるにつれて、非常に高濃度の VOC が排出されている実態が明らかになった。

これ以外のタンカーは複数の独立した貨物タンクを有しており、荷役作業中にタンクの切換えが行われる。これは、各タンクにおいて満載の確認を行う、すり切り作業を個別タンクごとに実施されることに起因している。陸上からの払い出し速度はタンク切り替え時にも一定であり、複数タンクへの分流比を変更することで対応している。

このように、他のタンカーでは、各タンクの満載時直前に現れる高い VOC 濃度が、複数回タンク切換えの回数に応じて出現する「鋸歯状」の濃度変化を経時的に示している。また、切換えが行われる前にも、他のタンク内に多少(50cm 程度の液面高さ)のカーゴが流入していることにより、切り替え直後の VOC 濃度が次第に上昇するため、荷役開始直後の 10 ppmC 以下の濃度(事前のガスフリー作業により非常に低い濃度となっている)から、タンク切り替え回数が増すにつれて、次第に VOC 濃度が高くなることがわかる。複数タンク切り替えの場合でも、各タンクの満載時直前の VOC 濃度は 10-45 %C 程度に達し、同じく改正大防法の貯蔵タンク規制値を上回る結果となった。

ここで、過去の調査との比較を試みる。東京都が平成 7 年に実施した炭化水素類排出低減技術(蒸発防止設備)マニュアルでは、船舶タンクを模擬して、小規模のコーンルーフトンクにおけるタンク内 VOC 濃度の測定を行っている。この際の満載時 VOC 濃度は 33 %C であって、今回の測定とほぼ同等であった。

また資源エネルギー庁が昭和 50 年に実施した石油産業における炭化水素ベーパー防止トータルシステム研究調査報告書によれば、50 %液面時及び 100 %液面時のタンク内 VOC 濃度はそれぞれ 0.3 %C と 50 %C となっている。安全規定により、タンカーのカーゴタンク内の満載液面が 95 %に抑えられている事を考え合わせると、このような過去の測定値と満載直前の測定値はほぼ同等と考えられた。ただし、50%液面時の濃度は図 12 で示した単一タンクの測定値(0.12 %C =12 ppmC)と比較すると、半分以下となっていた。これがガスフリー作業の影響によるものかについては、後述する。

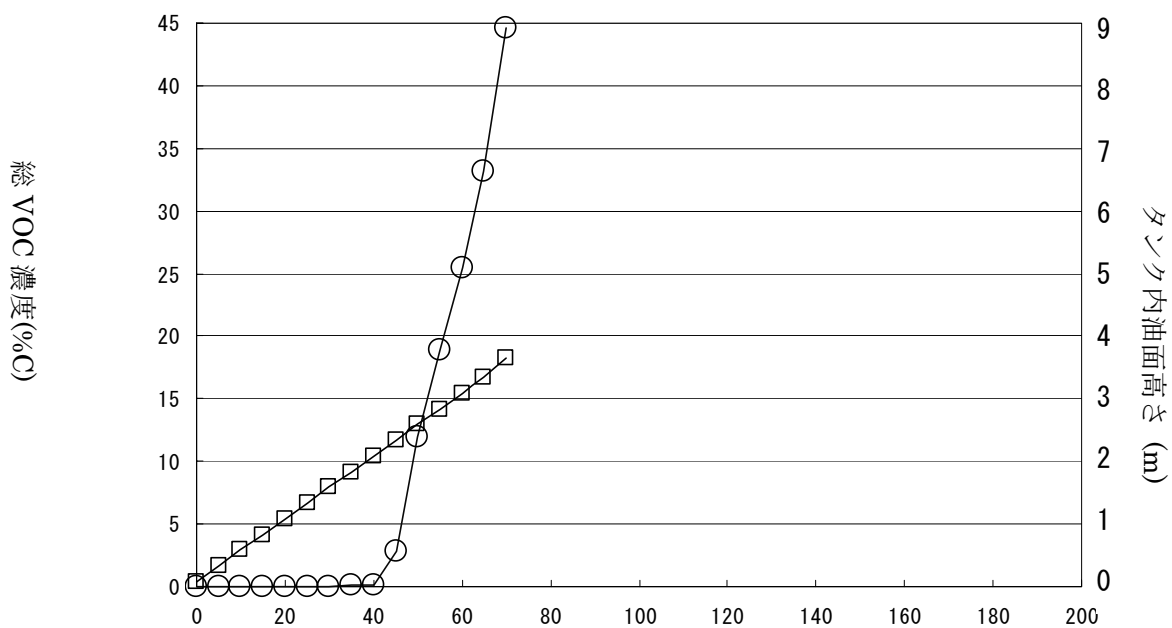


図 12 カーゴタンクから排出されるガス中の VOC 濃度と液面の時間変化(1000 kl タンカー)
 横軸は、荷役開始後の経過時間(分)、縦軸は○がベントポストから排出された VOC 濃度(炭素換算 %C)、□が液面高さ(m)

総ガソリン荷役量 986 kl、平均荷役速度 780 kl/時間(液面計を未搭載のため液面は推定値)、レギュラーガソリン。事前のガスフリー作業あり。3つのタンクに分入。単純平均 9.1 %C

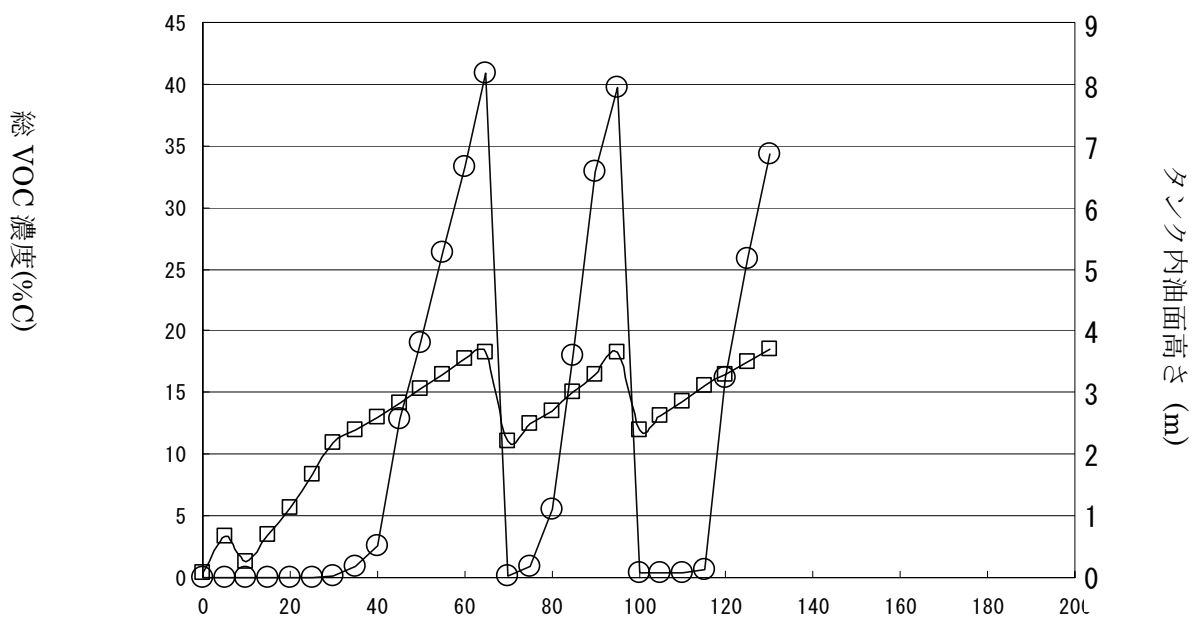


図 13 カーゴタンクから排出されるガス中の VOC 濃度と液面の時間変化(2000 kl タンカー)
 横軸は、荷役開始後の経過時間(分)、縦軸は○がベントポストから排出された VOC 濃度(炭素換算 %C)、□が液面高さ(m)

総ガソリン荷役量 1035 kl、平均荷役速度 790 kl/時間、レギュラーガソリン。事前のガスフリー作業あり。3つのタンクに分入。単純平均 11.5 %C

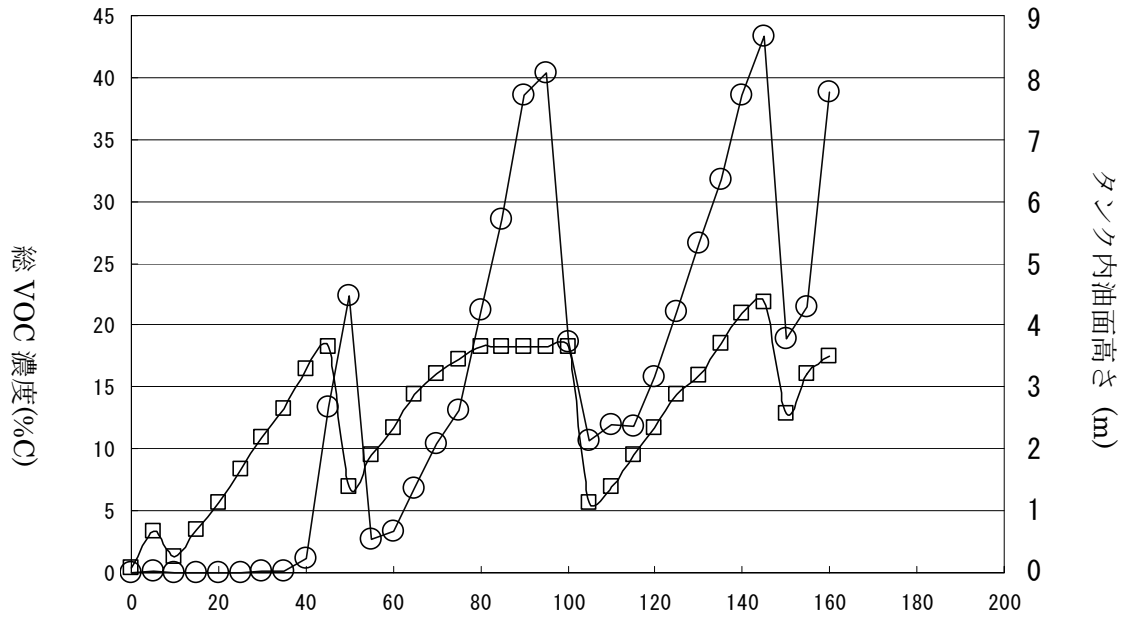


図 14 カーゴタンクから排出されるガス中の VOC 濃度と液面の時間変化(2000 kl タンカー)
 横軸は、荷役開始後の経過時間(分)、縦軸は○がベントポストから排出された VOC 濃度(炭素換算
 C%)、□が液面高さ(m)

総ガソリン荷役量 2035 kl、平均荷役速度 790 kl/時間、レギュラーガソリン。事前のガスフリー作
 業あり。3つのタンクに分入。単純平均 15.5 %C

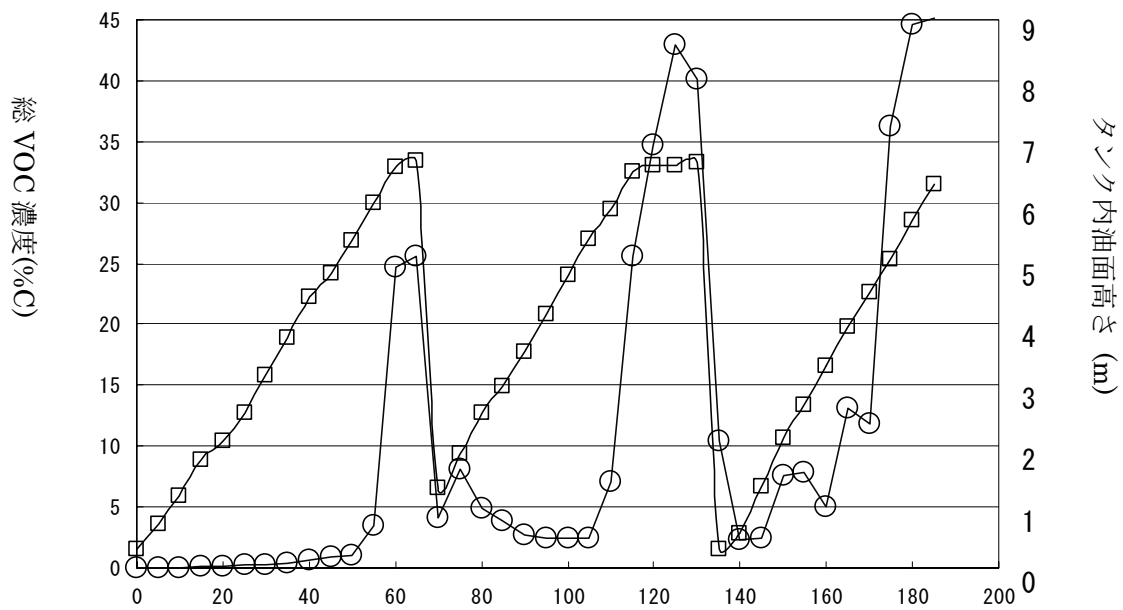


図 15 カーゴタンクから排出されるガス中の VOC 濃度と液面の時間変化(5000 kl タンカー)
 横軸は、荷役開始後の経過時間(分)、縦軸は○がベントポストから排出された VOC 濃度(炭素換算
 C%)、□が液面高さ

総ガソリン荷役量 2080 kl、平均荷役速度 780 kl/時間、レギュラーガソリン。事前のガスフリー作
 業あり。3つのタンクに分入。単純平均で 11.2 %C

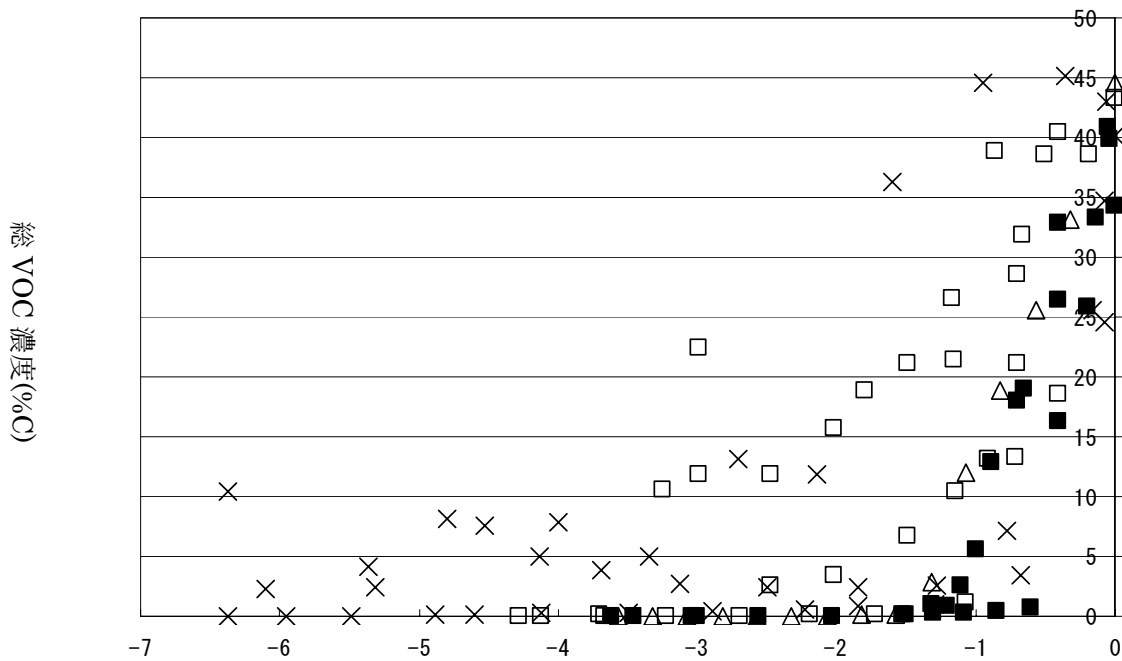


図 16 液面からタンク上面距離とカーゴタンクから排出されるガス中の VOC 濃度の関係
 横軸は満載時の液面高さからの差異 m。縦軸はベントポストから排出された VOC 濃度(%C)、△
 が 1,000 kl、□と■は 2,000 kl、×が 5,000 kl 積みタンカー。

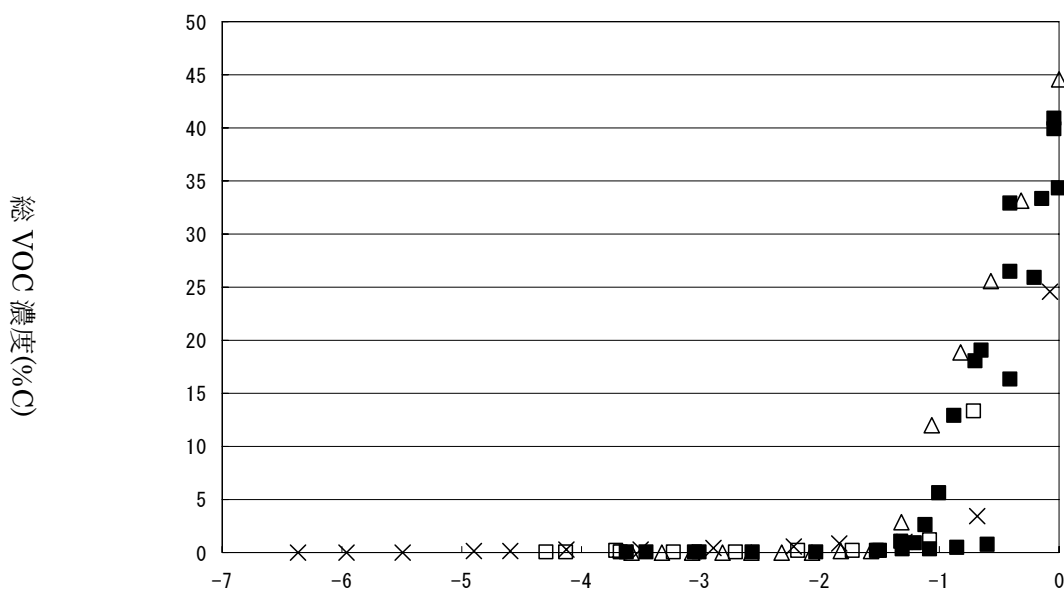


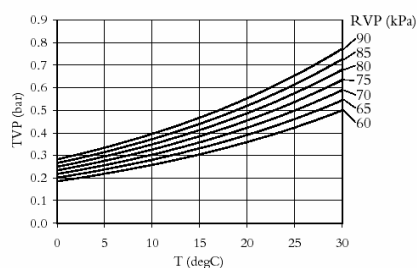
図 17 正規化した液面高さとカーゴタンクから排出されるガス中の VOC 濃度の関係
 (一度目のタンク切換えまで)
 横軸は満載時の液面高さからの差異 m。縦軸はベントポストから排出された VOC 濃度(%C)、△
 が 1,000 kl、□と■は 2,000 kl、×が 5,000 kl 積みタンカー。

次に 45%C 前後の高濃度について解析する。夏季におけるガソリンのリード蒸気圧は業界の自主的対応により 72 kPa 程度に抑えられており⁸、これを下式⁹の実験式により実際の気圧に転換すると、気温 30 °Cにおいて 61 vol%(=61 kPa /101.3 kPa)と計算される。ガソリン蒸気の平均炭素数を本測定の実測値である 3.89(表 12 に記載された組成比から算出)とすると、今回観測された 45 %C の VOC 濃度は、飽和蒸気圧の 19 %=(45/(61×3.89))に留まっており、飽和蒸気圧には遠く及ばない結果となっている。

$$p_i = k \times p_R 10^{[ap_R T + bT + cp_R + d]}$$

K	0.01
a	7.047×10^{-6}
b	0.01392
c	2.311×10^{-4}
d	-0.5236

Figure 5 - TVP of gasoline as a function of temperature and RVP



ここで、簡単なモデルを考える。蒸散速度を求めるKawamura and Mackay (1985)式に、上記のリード蒸気圧(72kPa)を代入すると、蒸散速度はおよそ0.167 kg/secと計算される。荷役全体では、およそ荷役量の0.15%のガソリン荷役起源のVOCが蒸散しており(排出係数は1.5 kg/t)、いずれかのタイミングで大気中に放出されることになる。上記の蒸散速度(一定)から、タンク内の空間が経時的に減少する際の濃度上昇を図 18に示した。簡易モデルにおいては、70分後の濃度はおよそ45%C程度となっており、実測値とほぼ合致する。

$$E = A \times KM \times \left(\frac{Mw \times Pv}{R \times T} \right) \quad (\text{kg s}^{-1})$$

where E = evaporation rate, in kg s⁻¹

A = area of the evaporating puddle (4m × 5m=20 m²)

K_M = mass transfer coefficient, in m s⁻¹

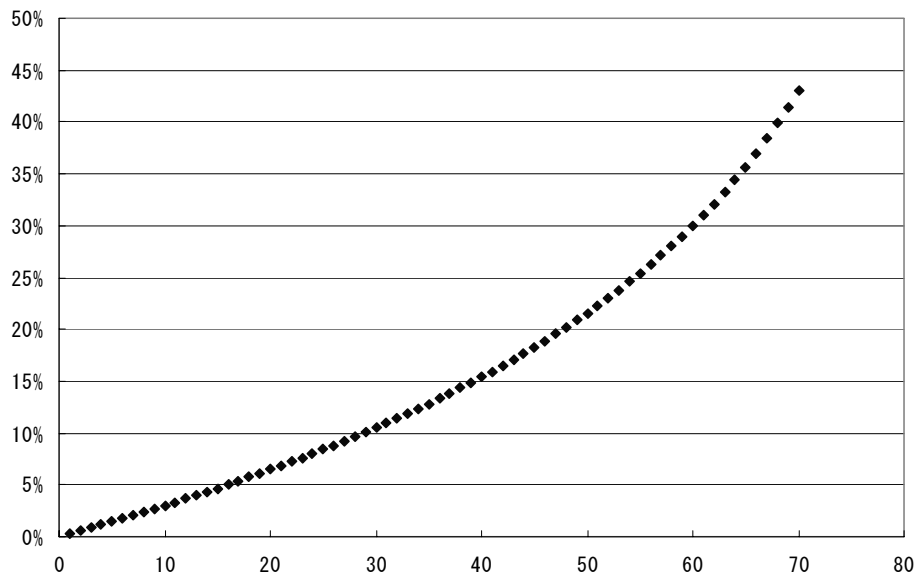
M_w = molecular weight of gasoline (66.1 kg kmol⁻¹)

P_v = vapor pressure, in Pa

⁸ 夏場のガソリンの蒸気圧については、品質確保法に基づくものではないが、石油精製事業者の自主的対応として、平成 10 年(1998 年)の中央環境審議会第三次答申を受けて、平成 13 年(2001 年)からは 72 kPa 以下とし、その後、昨年の本小委員会第一次答申及び中央環境審議会第五次答申において、平成 17 年(2005 年)以降 65 kPa 以下まで低減することとされた(平成 15 年、総合資源エネルギー調査会石油分科会石油部会石油製品品質小委員会、今後の自動車用燃料品質のあり方について)。

⁹ Measures to Reduce Emissions of VOCs during Loading and Unloading of Ships in the EU。原典は The Institute of Petroleum in the UK 資料とされている。

R = the gas constant (8314 J kmol⁻¹ K⁻¹), and
 T = ambient temperature, in K (20°C is equal to 293.2 K).



横軸は経過時間、縦軸は VOC 濃度(%C)タンク体積を 1200kl、蒸散速度を 0.17kg/sec、タンク内は完全混合、ガソリンの平均分子量 66、RVP72kPa、温度 30°Cとした。

図 18 ガソリントank内理論上 VOC 濃度の上昇

次に、仮に液面直上の濃度を 60%C と仮定し、単純に分子拡散による濃度勾配による境界層が液面上に定常的に形成されている、と仮定すると、45%C に達するまでの厚みはガソリンの分子拡散係数からおおよそ 60cm と計算され、満載時(95%積載時)のベイパー出口と液面の距離 45cm 程度(9m×0.05)とほぼ一致する。また、定常に至るまでの濃度の経時変化についても、発生速度関数は下記のように表される。

$$G(t) = G_0 \cdot \{ 1 - C(t) / C_{sat} \}$$

ここで、 $G(t)$ は発生速度関数、 G_0 は初期発生速度、 $C(t)$ は時刻 t の気中濃度、 C_{sat} は飽和蒸気濃度である。式中の $C(t)$ 上記の、液だまりのモデルを前提にすると、一定の温度で蒸発している物質では、次のように簡略化できる。

発生速度は、

$$G(t) = K \cdot (P_{sat} - P_{VB}(t))$$

$$G(t) = \{ 1000 \cdot K_t \cdot MW \cdot S_L \cdot (P_{sat} - P_{VB}(t)) \} / (R \cdot T_L)$$

となる。ここで、 $G(t)$ は発生速度関数 (mg/min)、 Kt は物質移動速度 (m/min)、 MW は分

子量 (g/mole)、SL は 蒸発液だまり面積 (m²)、Psat は密閉条件での化学物質の平衡あるいはヘンリー則の蒸気圧 (atm)、PVB(t)は 換気による局所的な条件下でおこる時間に依存する化学物質の実際の蒸気圧、R は気体定数 (8.205×10⁻⁵ atm×m³×mole⁻¹×K⁻¹)、TL は蒸発している液体の温度 (K) である。

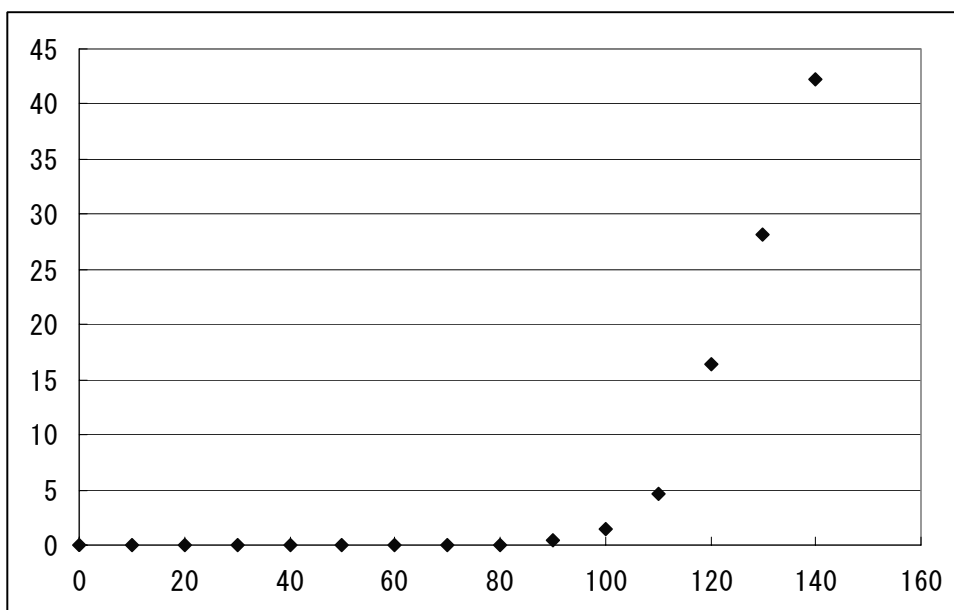
蒸発している液体の物質移動速度は EPA が用いている推定方法

$$K_t = 0.5 \cdot (18/MW)^{1/3},$$

$$P_{VB}(t) = C(t) \cdot T_{air} \cdot 8.2 \cdot 10^{-8} / MW$$

としており、これらの式で計算すると、60 分後の液面 1m の濃度計算値は下図に示すように 40%C となり、経時変化についてもほぼ測定値を同等の値が得られた。

50 %C 弱の VOC 濃度は飽和蒸気圧に満たないが、ガソリン荷積み作業終了直後では十分な蒸散が進んでいないためと考えられる。ただし、航海時には上部空間は、気密状態で運搬されるため、液面直上以外の空間においては飽和蒸気圧までの濃度上昇は進みにくい。今回の測定においても、揚げ荷直前の VOC 濃度は、搭載直後とほとんど変化がなく、現在の荷役作業形態では、飽和蒸気圧までの上昇はないものと考えられた。



横軸は経過時間、縦軸は VOC 濃度(%C)タンク体積を 1200kl、蒸散速度を 0.17kg/sec、タンク内は完全混合、ガソリンの平均分子量 66、RVP72kPa、温度 30℃とした。

図 19 ガソリタンク内理論上 VOC 濃度の上昇(液面 50cm、境界層による濃度勾配を仮定)

4隻のガソリタンカーに対する実測調査結果に基づき、ガソリン荷役・運搬時における排出係数について、その大半を占めると考えられる受入ロス時の排出係数、0.114 kg-VOC/t-燃料を得た。後述の船舶階級ごとの輸送量で重み付けを行った場合、排出係数は0.119 kg-VOC/t-燃料と計算される。

表 10 VOC 排出量のまとめ

タンカー kl級	荷役量 m ³	VOC 総排出量 m ³	タンク 切換え回数	高濃度時 排出量 m ³	低濃度の 排出量 m ³	高濃度排出量 による寄与率	タンク切換え直 後の排出量m ³ (2回目以降)	平均排出率 kg-VOC/ t-Gasoline
1000	986	23.1	1	22.6	0.49	97.9%	-	0.087
2000	1035	30.6	3	23.7	6.90	77.4%	3.21	0.110
2000	2035	81.1	4	58.2	22.85	71.8%	11.18	0.149
5000	2080	59.9	3	39.9	19.97	66.7%	9.74	0.108
								0.114

なお、EPAのAir Pollutant Emission Factors Part 42 : AP-42¹⁰においては、下式のような係数S(飽和係数)を導入し、飽和蒸気圧による理論上の排出係数E/Mw(t/t)を、補正するとしている。今回の測定では、小型タンカーにおけるSは0.04、それ以外のタンカーでは0.05と計算できる。この数値は、EPAのサブマージローディング時のS値0.2よりも大幅に低い。その理由として、米国に比較してタンカーの大きさが小さく、安全面から荷役速度が小さくなっていることが考えられる。

また、今回測定したタンカーは全てガスフリー作業を実施しており、荷役開始直後のVOC排出濃度が小さくなる可能性、また同じく安全面からタンク容量の95%までガソリンを搭載することになっており、荷役終了直前の濃度も小さくなる可能性のあることが指摘された。ただし、2.2.3項のアンケート調査では、ガソリタンカーでは年間100回程度のガスフリー作業を実施されており、ガスフリー作業が日常化していることから、今回のVOC排出係数を平均的な数値として用いても差し支えないと考える。今後国内外のガソリンオペレーションの差異について情報を収集することで、排出係数の差異について考察することが重要であると考えられた。

¹⁰ U.S. EPA, Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, AP 42, Fourth Edition, Volume I Chapter 5: Petroleum Industry

$$E = S \frac{M_w p_v m_l}{10^3 RT \rho_l}$$

where E the emission in tonnes
 M_w the molecular weight of the vapour
 p_v the vapour pressure of the cargo in Pa
 m_l the mass of liquid loaded in tonnes,
 R the gas constant in J/(mol.K)
 T the absolute temperature in K
 ρ_l the density of the liquid in kg/m³
 S 飽和係数、無次元

表 11 EPA の Air Pollutant Emission Factors, AP-42 における S(飽和係数の設定例)

Cargo Carrier	Mode of Operation	S Factor
Marine vessels	Submerged loading: ships	0.2
	Submerged loading: barges	0.5
Tank trucks and rail tank cars	Submerged loading of a clean cargo tank	0.50
	Submerged loading: dedicated normal service	0.60
	Submerged loading: dedicated vapour balance service	1.00
	Splash loading of a clean cargo tank	1.45
	Splash loading: dedicated normal service	1.45
	Splash loading: dedicated vapour balance service	1.00
本測定	小型タンカー(Submerged loading: ships of a clean cargo tank)	0.04
	中型タンカー(Submerged loading: ships of a clean cargo tank)	0.05

ただし、ガソリンと原油に対しては上記 S 係数を適用するより、実測値からの推定を推奨すると記載されている。

排出された VOC の成分について表 12 に示した。国立環境研究所によるガソリンそのものの組成(表 12 の右側に示す)との比較では、ガソリン荷役起源の VOC の方が軽量成分が増加していることがわかる。ブタンの成分比は 49.7(n-ブタンとイソブタンの合計)から 65.2(C4 paraffins に相当)に増加し、n-ペンタンの成分比 11.1 から 27.2(C5 paraffins に相当)と大幅に増加している。一方、オレフィン系の成分はガソリン中の成分比に対して VOC 内の成分比では、蒸気圧が軽量成分に比較して小さいことから、全て割合を落としている。

なお、欧米においては、ガソリン中にオクタン価改善などを目的として添加される MTBE などの微量成分の有害性が問題になっているが、日本においては現在 MTBE の混入は行われていないことから、今回の測定では MTBE などの微量成分は測定していない。

表 12 ガソリン VOC 組成表
(左表が荷役由来 VOC 中の濃度組成割合、右表がガソリン中の濃度組成割合)

Component	Vol % MW
C3 paraffins	<0.1
C4 paraffins	65.2
C5 paraffins	27.2
C6 paraffins	0.5
C7 paraffins	0.3
C8 paraffins	<0.1
C4 olefins	3.3
C5 olefins	1.9
C6 olefins	0.1
C7 olefins	<0.1
C8 olefins	<0.1
C6 aromatics	0.5
C7 aromatics	0.2
C8 aromatics	0.1

GC-FID による体積濃度組成%

右表の出典は「都市域における VOC の動態解明と大気質に及ぼす影響評価に関する研究」

((独)国立環境研究所；平成 12 年)

VOC コード	VOC成分	排出量 構成比(%)
1	n-ヘキサン	2.5%
2	シクロヘキサン	0.1%
3	ベンゼン	0.6%
4	トルエン	0.7%
5	キシレン	0.2%
7	1,3,5-トリメチルベンゼン	0.001%
76	n-ヘプタン	0.1%
77	n-ペンタン	11.1%
103	エチルベンゼン	0.03%
109	n-オクタン	0.02%
162	メチルシクロヘキサン	0.1%
171	n-ブタン	25.5%
172	イソブタン	24.2%
174	cis-2-ブテン	10.4%
175	trans-2-ブテン	6.7%
176	2-メチルペンタン	4.4%
177	2-メチル-2-ブテン	3.4%
178	2-メチル-1-ブテン	2.2%
179	trans-2-ペンテン	1.8%
180	cis-2-ペンテン	1.8%
181	2,3-ジメチルブタン	1.1%
182	2,2-ジメチルブタン	1.0%
183	メチルシクロペンタン	0.9%
184	3-メチルヘキサン	0.4%
185	2,4-ジメチルペンタン	0.3%
186	1-ヘプテン	0.2%
188	3-メチルヘプタン	0.1%
189	1-ヘキセン	0.04%
190	2-メチル-1,3-ブタジエン	0.1%
191	1,2,4-トリメチルベンゼン	0.01%
192	2,2,4-トリメチルペンタン	0.01%
193	1,2,3-トリメチルベンゼン	0.001%
194	n-プロピルベンゼン	0.0003%
195	2,3,4-トリメチルペンタン	0.0004%
196	1,4-ジエチルベンゼン	0.0001%
	合計	100.0%

(b) 原油排出係数

原油タンカーを対象に VOC 測定を行った当財団の調査(平成 13 年度船舶排ガスの環境への影響と排出抑制に関する総合的調査)の概要を、表 13 から表 16 に示した。

原油洗浄を行う前提では、ガソリンタンクとは異なり、初期の濃度が 15 vol%程度になっており、その後 41%まで VOC 濃度が上昇する。原油の場合は、S 係数 1 以上になることが知られている。メタンやエタンなど蒸気圧の高いガス物質が大量に荷役中に蒸散するためである。同報告書のシミュレーション結果では、放出される発生ガス量は、原油積み荷総体積の約 1.8 倍とされている。VOC 放出量は発生ガス量のほぼ 40 %、原油積み荷総体積の約 $1.8 \times 0.4 = 0.72$ 倍と想定されている。NMVOC の比率が 85 %、原油の比重 0.89、VOC 平均分子量を 48 とすると、0.14 kg/ton 原油と計算される。この値は表 17 に示した EU の原油データの 1/10 程度となっている。日本国内で荷役される原油は、中近東など原産地における荷役、原油輸送、さらに一次備蓄基地での保管などの際に、軽量成分が蒸散していると考えられることから、妥当なものと考えられた。

表 13 当財団 2000 年調査における調査対象船舶及び調査期間など

対象船	原油タンカー
調査期間	2000年12月1日～12月9日
総トン数	約70,000総トン
航路	国内原油備蓄基地-国内石油精製工場
積荷	Quate、Iranian Heavy、Arabian Light原油の混合。
分析項目	FID/MS(水素炎イオン化検出器)を用いた炭素数7までの揮発性炭化水素ガス濃度及びそれらの総計として TOC(総炭化水素量)濃度。 ただし、主たる対象物質はメタンである。

(平成 13 年度船舶排ガスの環境への影響と排出抑制に関する総合的調査報告書より作成)

表 14 バラスト航海時のタンク内原油ガス組成濃度(vol%)
(深さ方向の変化、出港後 約 24 時間後)

タンク頂部と採取ポイントの距離	1 m	5 m	10 m	15 m
メタン	0.59	0.58	0.63	0.62
エタン	0.66	0.67	0.71	0.70
プロパン	2.27	2.31	2.45	2.41
ブタン	3.19	3.25	3.44	3.38
ペンタン	2.00	2.05	2.17	2.14
ヘキサン	0.89	0.91	0.97	0.95
ヘプタン	0.27	0.28	0.30	0.29
TOC	9.86	10.06	10.70	10.50

ほぼ+300 mmHg に加圧された状態から常圧まで点検口を開放し減圧した後、採取した。

(平成 13 年度船舶排ガスの環境への影響と排出抑制に関する総合的調査報告書より作成)

表 15 原油洗浄作業による揚げ荷作業直後のタンク内原油ガス組成濃度への影響(vol%)

	バラスト航海出向直後	
	原油洗浄なし	原油洗浄実施
メタン	0.61	0.87
エタン	0.69	0.82
プロパン	2.37	3.72
ブタン	3.32	5.19
ペンタン	2.08	2.97
ヘキサン	0.92	1.07
ヘプタン	0.28	0.23
TOC	10.26	14.89

表 16 原油積み込み作業直後及び積荷航海時のタンク内原油ガス組成濃度 (vol%)

(入荷開始からの経過時間)	出港直後	積荷航海時	
	6時間後	40時間後	48時間後
メタン	4.51	6.75	7.42
エタン	7.52	8.16	8.34
プロパン	14.59	14.82	15.05
ブタン	9.82	9.93	10.04
ペンタン	3.65	3.67	3.69
ヘキサン	1.22	1.22	1.21
ヘプタン	0.33	0.33	0.32
TOC	41.63	44.88	46.07

深さ方向の採取点は一点

表 17 UK における原油 VOC 排出係数との比較

Operation	原油のVOC排出係数 kg-NMVOC/t-CrudeOil
Offshore Loading	0.6-1.1
Onshore loading	1.2-2.5
本調査(原油洗浄あり)	0.14
米国(EPA)	0.13

原油の値にはメタンとエタンが含まれていない

(c) ケミカル排出係数

ケミカル物質に関する排出係数を表 18 に示した。EU レポートでは、S 係数をガソリン荷役起源の VOC と同じく 0.175 と設定しているが、我が国においてはケミカル物質海上輸送が小口で行われることが多くことを考えると、ガソリンよりもタンク満載まで積み込むことが少なく、また、複数タンクへの同時積み込みも少ないことから、過大となる可能性もある。別途実施されている(独)海上技術安全研究所の測定¹¹でも、ベンゼンタンクの満載時における排出濃度の飽和蒸気圧に対する割合は実測で 45 %程度であり、ガソリン荷役起源の VOC の 20 %ほどではないまでも飽和蒸気圧までは達していない。分子量が大きく密度の重いケミカル物質由来の VOC は、カーゴのタンク内において空気密度との差異により、液面から垂直方向に濃度勾配ができており、ベントから実際に排出される排出濃度は飽和蒸気圧に達していないと考えられる。一方、タンク切換え時には高密度ガスが一部のベイパー配管に滞留したり、他のタンク下部に流入する事により、切換え直後の濃度を押し上げている可能性もある。

このため、ガソリンタンカーで検討を行った S 係数(飽和蒸気圧×荷役容量に対する実際の排出量の割合)が、そのままケミカルタンカーに対して適用できるとした。仮に、小型タンカーの S 係数 0.04(表 11 参照)を採用した場合の、荷種ごとの VOC 排出係数を表 18 に示した。

表 18 ケミカルタンカーにおける VOC 排出係数

	アセトン	ベンゼン	トルエン	メタノール	ジクロロエタン
temp温度	30	30	30	30	30
TVP(蒸気圧kPa)	19.6	7.84	2.21	9.84	13.3
Mw(分子量)	58.65	78	92.14	32	98.96
R気体定数	8,314	8,314	8,314	8,314	8,314
ρ比重	0.791	0.8765	0.8669	0.793	1.25
S(S係数)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
E排出係数kg/ton	0.023	0.011	0.004	0.006	0.016

EPA の Air Pollutant Emission Factors, AP-42 より算定。

ただし S 係数として、小型ガソリンタンカーの実測値 0.04 を仮定した。

(d) エンジンからの排出係数

IPCC(気候変動に関する政府間パネル)では、船舶用エンジンからの NMVOC(メタンを除く VOC)排出係数は、大型自動車用ディーゼル機関のデータをもとに 12 g-VOC/kg-fuel という値が採用されているが、船舶機関が低速であること、燃料が低質であり炭素数の少ない未燃分の発生は少ないと予測されることなどから、上記の値より低いことが予測される。日本マリンエンジニアリング学会では、実船舶実験により、定常状態での THC(メタン濃度+NMHC 濃度)の排出係数は 1.2~3.0 g/kg-Fuel 程度であることから、2.5 g-VOC/kg-fuel を採用している。

本調査では、当財団平成 10 年度「船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書」の 1.9 g/kg-Fuel を採用した。Lloyd's による排ガス実測調査結果においては、THC が 2.5 g/kg-Fuel であり、そのうち 12 %が CH₄ という数値が報告されている。そこで、残りの 88 %が NMVOC と考え、1.9(=0.88×2.5) g/kg-Fuel を、VOC 排出係数とした。

¹¹ 船舶から発生する有害揮発性ガスによる複合汚染の低減に関する研究(2004、間島隆博他)

(e) VOC 排出係数のまとめ

表 19 に原油とガソリンのそれぞれについて荷役由来の VOC 排出係数を示した。ガソリンで比較すると 1 以上の群と 0.2 以下の群の二つに分かれる。1 以上の群は地下タンク、タンクローリーもしくは飽和蒸気圧から算定したものである。今回、実測により満載時においても飽和蒸気圧に達することのないことが確認されており、EPA が定義する S ファクターが 0.1 程度であることから考えて、0.1~0.2 kg-VOC/t-燃料の排出係数が妥当であると考えられた。

その結果、原油とガソリンの荷役由来の VOC について、荷役量トン数当たりそれぞれ 0.14 及び 0.12 kg-VOC/t-燃料という排出係数を得た。両数値は表 19 に示すように、従来報告されている排出係数に比較すると小さい。この点については、以下に示すような誤差要因について検討を行った。

① 測定の誤差

既に述べたように、今回の測定では、ベントポストから実際に大気に排出されるガス中濃度の測定を行った。荷役速度(800 kl/時間前後)から考えて、ポスト開口部からの放出速度は 4 m/sec 程度になり、風の吹き込みなど周辺大気による希釈は十分に無視できる。その他、サンプリング管への吸着、測定器による感度の影響についてはいずれも考慮済みであること、ガス量は荷役体積に基づいた計算を行っていることから、十分な精度が確保できていると考えられる。

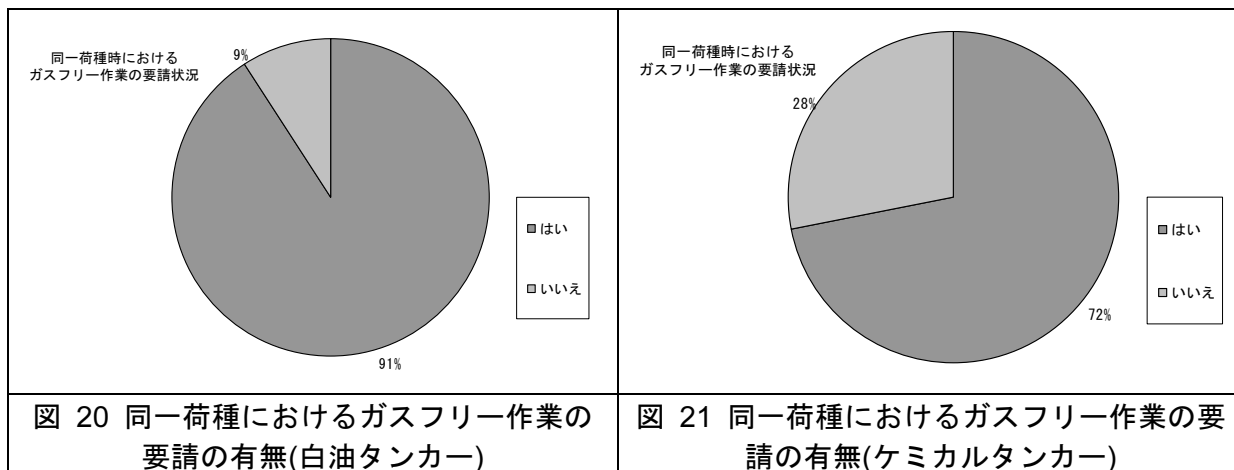
② 調査対象としたタンカーのオペレーションの代表性

今回測定対象とした 4 隻のタンカーは、いずれもガスフリー作業を行っており、荷積み開始時のタンク内 VOC 濃度が実施していないタンカーに比較して小さくなっている可能性がある。

また、我が国における白油タンカーの平均的なオペレーションが、調査対象の 4 隻と異なり、ガスフリーを行っていないという場合には、その補正が必要となる。

ただし、本調査で別途実施したアンケート調査によれば、下図に示すように同一荷種においても、白油タンカーにおいても 9 割のタンカーが荷主から要請によりガスフリー作業を行っており、代表性は充分確保できると考える。

また、航行時間が短い場合は、タンク内において蒸散が十分に進まない(タンク内 VOC 濃度が十分に上昇しない)可能性が考えられる。この効果が影響を及ぼすのはガスフリー前のタンク濃度であり、荷役時の効果ではない。ちなみに、航行時間については 5000 kl 積みタンカーでは、およそ 20 時間を経ており、国内輸送としては平均的な運航時間を網羅していると考えられる。この際の、荷積み終了時のタンク内濃度は 44.5 %C、20 時間後の荷揚げ直前のタンク内濃度は、42 %C であった。



③ 荷積み時の排出を小さくする要因

排出係数を小さくする要因として以下の要因が考えられる。

a. ガスフリー作業の影響

荷積み開始直後のタンク内 VOC 濃度は、ガスフリー作業を行うことにより、500 ppmC 前後(本調査における荷揚げ作業直後のタンク内濃度)から 10 ppmC 以下(本調査における荷積み開始直後のタンク内濃度)に低下すると考えられる。

開始直後のタンク内濃度低下に伴い、荷積み時の排出係数が低くなる。つまり、1980 年代の調査においてタンク荷積み時で排出されていた VOC が、現在ではガスフリー作業により海上で排出されていると解釈する事ができる。この場合、ガソリン荷役・運搬時全体からの排出を、ガスフリーを除いて評価することは、過小評価に繋がることになる。例えば、米国の資料ではガスフリーの有無で、排出係数が 0.17 から 0.23 kg-VOC/t-燃料にむしろ増加する排出係数が提唱されている。

仮に荷積み作業終了時にタンク内に残った空間体積である 5%(荷役量はタンク満載時の 95%に制限される)×荷積み作業終了時の VOC 量が、ガスフリー作業において大気中に放出されたと仮定すると、排出係数のおよそ 2 割に相当し、ガスフリー時の排出係数はおよそ 0.03 kg-VOC/t-燃料、全体の排出係数は 0.15 kg-VOC/t-燃料と計算される。しかし、この計算は上記のように、明らかに過小評価である。

昨年度測定を実施した 1000 kl 積みタンカーにおいてガスフリー前後の濃度に 1000kl の掃気体積(ファンの定格風量×時間)を掛けることによって大気に放出された VOC 重量を計算すると約 138 kg となる。これは排出係数に換算すると 0.14 kg-VOC/t-燃料に相当する。1,000 kl のカーゴタンク内におよそ 160 l のガソリンが底面もしくは壁面に付着あるいは残留していることに相当する。ガスフリー前後の濃度差にタンク体積を乗じて算出することも一つの方法であるが、ガスフリー前に壁面及び底面に残留した VOC の蒸発量を見込んでいないので過小評価に繋がると考えられる。

現在のオペレーションは、タンクを完全に乾燥状態にするまでガスフリー作業を行っており、過去の調査時においては、荷役中に発生していたベイパー分より多くの蒸散を強制的に

海上で放出しているものと考えられる。

本報告書では、結論としてガスフリーを前提に、荷役時の排出係数を 0.12 kg-VOC/t-燃料、ガスフリー時の排出係数を 0.14 kg-VOC/t-燃料と設定することとした。

b. 荷役速度の影響

ガソリンの荷役速度により、液面からの蒸散速度が影響を受ける可能性がある。静的液面からの蒸散を考えると、有限の蒸散速度を持った液面からの荷積み作業全体からの放出量は、荷役速度の増加(=荷積み時間の短縮)によりむしろ少なくなる。一方、液面へのスプラッシュなどによる蒸散量は、荷役速度の増加により増加する。後者は、非線形で増加する可能性も考えられる。どちらの要因が、排出係数全体に対して支配的であるかの判断は難しい。

図 19 に示した濃度モデルにおいてはスプラッシュなどによる濃度境界層の破壊現象(あるいは VOC 拡散現象)を扱う事はできない。ただし、境界層の厚さが 1m と比較的厚いこと、液面面積がパイプ直径に対して 100 倍以上に広いことから、スプラッシュによる影響は少ないものと考えられた。

c. 余剰空間の影響(タンク満載積載体積に対する荷積み制限)

現在、国内タンカーのカーゴタンクには満載積載の 95 %までしか荷積みができない。過去においても、満載積載に関する制限は 95 %であったが、30 年前は液面計などの測定器の設置がなく、巻尺や目測などによる実測が行われていたため、その誤差は現在よりも大きくなっていった可能性がある。

仮に、5000 kl 積みのタンカーにおいて、各タンクの濃度上昇分を直線近時した場合、タンク容量に対して 95 %からさらに 1 %荷積みを行った場合、濃度境界層に入った濃い VOC 濃度(45 から 49%程度になると予測される)、これにより、全体の排出係数はおよそ 2.5 %増加すると考えられる。

d. その他の影響

リード蒸気圧の差異。ガソリン組成の変更により、近年のガソリンのリード蒸気圧は自主的に抑えられており、その効果が蒸散速度にも影響している可能性がある。

表 19 各調査におけるガソリン荷役起源の VOC 排出係数の比較

	ガソリン荷役起源 の VOC (kg-VOC/t-燃料)	補足
EU レポート	燃料平均で 0.18 ガソリンは 0.24	いずれもタンカーの排出係数
PRTR マニュアル (ガソリン地下タンク)	1.06	ガソリン地下タンクに対する排出係数
UK	0.15	タンカーの排出係数
当財団(過去調査)	1.11	タンカーの排出係数 (タンク内が飽和蒸気圧で満たされていると仮定した)
資源・エネルギー庁	0.24	環境省の VOC 試算でも用いられる
EPA	0.17	S=0.2 として計算した理論値
本報告書	ガスフリーを含めたガソリン荷役 0.23 (荷役時)	タンカー4 隻の実測結果から算定。 ガスフリー前後の濃度差と掃気体積から計算。 上記の
	0.12	
	(ガスフリー時) 0.14	
	合計 0.26	

- EU レポート Measures to Reduce Emissions of VOCs during Loading and Unloading of Ships in the EU(2002)。原典は UK Petroleum Industry Association(UKPIA)のもの。
- PRTR マニュアル 経済産業省環境省 P R T R 排出量等算出マニュアル第 2 版(ただしに対するもの)
- 当財団(過去調査) 平成 13 年度船舶排ガスの環境への影響と排出抑制に関する総合的調査報告書
- エネルギー 石油産業における炭化水素ベイパー防止トータルシステム研究調査報告書(昭和 50 年)掲載値は 0.12 と 0.19 kg-VOC/kl 出荷
- UK Guidelines for the Design & Operation of Gasoline Vapour Emission Controls
- 東京都 炭化水素類低減技術(蒸発防止設備)マニュアル、東京都平成 7 年
- EPA Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, 2003

2.2.2 VOC 排出量の算定に関する調査

(1) 輸送量に関する統計量

カーゴタンクから発生する VOC 排出総量を算定するために、国内の輸送総量に関する基礎的な統計量を収集整理した。まず、平成 16 年 3 月末現在の船舶台帳収録明細は表 20 のとおりである。また、内航輸送統計年報の基礎統計となっている元請輸送量調査(1 号票)によると、石油類、ケミカルをあわせた輸送量の実績は表 21 に示すとおりである。黒油及び油脂タンカー及び特殊タンクタンカーが運搬する荷物からの VOC 発生は、前 2 者は蒸気圧が低いこと、特殊タンク船の荷役はクローズドサイクルで行なわれることから、両者の排出は非常に少なく、無視できると考えられる。

一般タンカーの中では、主に、軽油、ガソリン、灯油を運搬する白油タンカーが隻数、カーゴタンクのもの容量とも多く、また一隻あたりの平均容量も 2,200 m³ と比較的大きい。ケミカルタンカーは一隻あたりの平均容量が 1,047 m³ で、平均総トン数も 461 総トンと、499 総トンクラスや 299 総トンクラスの小型タンカーによる輸送が主となっていることがわかる。

輸送量で見た場合、やはり白油の輸送量が最も多く、平成 14 年度で 96,738,159 kl、平成 15 年度で 96,197,153 kl と、およそ 1 億 kl に近い値を示している。なお、港湾統計では、同年の石油製品の移出量が 80,031,765 t となっており、ガソリンなどの白油に占める石油製品類の比重から考えると、約 1 億 kl の白油輸送量は充分に実態を把握していると考えられる。また、のべカーゴタンク容量(m³)で、年間輸送量(kl 又はトン)を割った平均利用率でみると、黒油、白油がそれぞれ 123 回/年、108 回/年と、ほぼ半分程度の利用率となっているのに対して、ケミカルでは 76 回/年と低くなっている。これは船舶あるいはタンク容量の大小というより、輸送の需要供給において小口の航海の多いことが影響していると考えられる。

なお、以降の VOC 排出量算出のために白油(軽油、ガソリン、灯油など重油以外の燃料および潤滑油の総称)の内訳が必要になる。しかし、表 21 で示した統計元請輸送量調査(1 号票)には、白油合計としてのみ計上してある。また、内航輸送統計年報では、ガソリン、ナフサ、灯油、軽油、潤滑油を石油製品として計上しており、さらに港湾統計においても「その他石油類」にもその内訳について記載がないため、白油中のガソリン荷役の割合については、統計量が存在しない。

今回の試算では、平成 15 年の資源・エネルギー統計年報における、国内向け販売及び輸出品の比率から、白油全体の約 31%(平成 15 年の国内向け及び輸出品約 1.9 億 kl のうち、約 0.6 億 kl がガソリン)をガソリンと仮定して計算を行った。

表 20 内航タンカーの隻数と輸送キャパシティー(船舶台帳収録明細)

	隻数	のべ総トン数 G/T	のべカーゴタンク m ³
黒油船	384	215,227.60	484,386
白油船	400	426,208.26	890,389
油脂船	16	3,331.45	7,978
油脂艇	11	1,466.20	2,496
ケミカル船	196	90,364.24	205,212
一般船中計	1007	736,597.75	1,590,461
高压液化ガス船	143	109,868.91	178,612
高温液体船	31	22,055.00	34,064
耐腐食船	188	46,989.45	65,436
整合船	20	8,226.00	15,989
特殊タンク船中計	382	187,139.36	294,101
合計	1389	923,737.11	1,884,562

表 21 内航タンカーによる液体貨物輸送量(元請輸送量実績表)

	品目	平成 14 年度	平成 15 年度	前年 対比(%)	単位	タンクの 平均利用率
一般タンカー の貨物	黒油	58,986,103	59,517,803	100.9	kl	123
	白油	96,738,159	96,197,153	99.44	kl	108
	小計	155,724,262	155,714,956	99.99	kl	-
	油脂	983,678	1,054,769	107.23	t	-
	ケミカル	16,057,031	15,668,135	97.58	t	76.
	小計	17,040,709	16,722,904	98.14	t	-
	合計	172,764,971	172,437,860	99.81	t	-
特殊タンク 船の貨物	液化石油ガス	8,098,534	7,853,482	96.97	t	-
	エチレン	698,951	643,619	92.08	t	-
	塩ビモノマー	525,374	638,430	121.52	t	-
	液化アンモニア	449,744	482,754	107.34	t	-
	アセトアルデヒド	102,963	100,476	97.58	t	-
	その他の高压ガス	41,031	256,364	624.81	t	-
	小計	9,916,597	9,975,125	100.59	t	-
	アスファルト	2,198,909	1,659,479	75.47	t	-
	石炭系液体油	283,987	278,519	98.07	t	-
	その他高温液体	1,288,933	1,374,447	106.63	t	-
	小計	3,771,829	3,312,445	87.82	t	-
	硫酸	3,083,546	3,005,611	97.47	t	-
	苛性ソーダ	3,704,190	3,773,120	101.86	t	-
	その他化学品	2,150,017	2,281,855	106.13	t	-
	小計	8,937,753	9,060,586	101.37	t	-
	合計	22,626,179	22,348,156	98.77	t	-
	総計	195,391,150	194,786,016	99.69		-

黒油及び白油の単位は kl、その他の貨物の単位はトン、総計は比重 1 として計算。

白油輸送量には、石油化学系に用いられる分解ガソリン等石油類似物質等が一部含まれる

(a) 船型別白油輸送量に関する統計量

油槽船船腹量調査のオペレーターアンケート調査によると、平成15年における白油の輸送量は表22に示すとおりであり、白油輸送においては、2,000kl搭載と5,000kl搭載の船舶が、その多くを占めており、両者の合計では66%を占めている。また6月と12月の船型ごとの輸送量は表23及び表24に示すとおりであるが、両月の差異が少ないことから、この輸送形態が年間の平均的な姿を現しているものと考えられる。また、1隻あたりの荷待ち日数も3日程度と短く、タンクの容量の大きさや使用頻度の両方から、両者の船型クラスが白油輸送の主力となっていることがわかる。

表22 内航タンカーによる船型ごとの白油輸送量(集約)

積荷	船型	6月と12月の輸送量合計	船型ごとの割合
白油船 船腹量 890(千m ³)	500kl積未満	364,184	4%
	500kl積	540,868	6%
	1,000kl積	499,716	6%
	2,000kl積	1,907,040	22%
	3,000kl積	981,108	11%
	4,000kl積	490,350	6%
	5,000kl積以上	3,789,117	44%
	小計	8,572,382	100%

油槽船船腹量調査のオペレーターアンケート調査より作成

表 23 内航タンカーによる船型ごとの輸送量(6月)

積荷	船型	隻数	延航海数	総輸送量 kl	荷待ち及び 不稼動日数	1隻当たり 荷待ち日数
白油船 船腹量 890(千m ³)	500 kl 積未満	52	932	238,343	373	7.2
	500 kl 積	49	754	398,856	343	7.0
	1,000 kl 積	29	395	420,131	143	4.9
	2,000 kl 積	71	780	1,534,452	227	3.2
	3,000 kl 積	27	274	764,635	93	3.4
	4,000 kl 積	7	94	383,747	43	6.1
	5,000 kl 積以上	86	670	3,349,168	255	3.0
	小計	321	3,899	7,089,332	1,477	4.6
黒油船 506(千m ³)	500 kl 積未満	98	2,079	375,151	472	4.8
	500 kl 積	63	1,018	446,053	261	4.1
	1,000 kl 積	71	919	851,172	269	3.8
	2,000 kl 積	61	580	1,127,642	205	3.4
	3,000 kl 積	11	98	270,318	36	3.3
	4,000 kl 積	0	0	0	0	0
	5,000 kl 積以上	38	364	1,733,979	148	3.9
	小計	342	5,058	4,804,315	1,391	4.1

船種の数値はのベカーゴタンクの体積を示す。

表 24 内航タンカーによる船型ごとの輸送量(12月)

積荷	船型	隻数	延航海数	総輸送量 kl	荷待ち及び 不稼動日数	1隻当たり 荷待ち日数
白油船 船腹量 890(千m ³)	500 kl 積未満	51	1,275	363,424	193	3.8
	500 kl 積	46	1,011	538,482	148	3.2
	1,000 kl 積	26	473	497,610	104	4
	2,000 kl 積	68	946	1,889,728	164	2.4
	3,000 kl 積	29	323	971,899	67	2.3
	4,000 kl 積	7	114	490,350	25	3.6
	5,000 kl 積以上	89	750	3,752,276	250	2.8
	小計	316	4,892	8,503,769	951	3
黒油船 506(千m ³)	500 kl 積未満	104	2,602	443,190	473	4.5
	500 kl 積	55	941	421,804	201	3.7
	1,000 kl 積	61	888	865,890	244	4.0
	2,000 kl 積	61	646	1,270,066	295	4.8
	3,000 kl 積	9	80	190,680	26	2.9
	4,000 kl 積	0	0	0	0	0
	5,000 kl 積以上	31	292	1,384,464	146	4.7
	小計	321	5,449	4,576,094	1,385	4.3

船種の数値はのベカーゴタンクの体積を示す。

(b) 船型別ケミカル輸送量に関する統計量

ケミカルタンカーの輸送量について、表 25 から表 29 に示した。表 28 によると、BTX(ベンゼン、トルエン、キシレン)を含む上位 10 品目でトンベース輸送量の 63 %を占める。このうち、蒸気圧が高く VOC 発生が考えられるのは、キシレン、ベンゼン、メタノールなどごく一部である。既に(a)項で述べたように、ケミカルタンカーでは小口の輸送が多く、表 26 及び表 27 に示すように、全体では 1000 kl 積みタンカーでの輸送が半分以上を占めている。表 29 に示すように物質ごとでも大きな相違は見られないが、キシレンでは 1700 kl 以上の輸送も多くなっている。表 29 には、実際に VOC 排出が予想される 35 °C 付近での蒸気圧が 22 kPa 以上の物質を抽出した。ベンゼン、メタノール、トルエン、ジクロロエタン、アセトンの 5 物質であると予想される。

表 25 ケミカルタンカー輸送量の経年変化

年	年間輸送量 (千トン)
1997 年	16,565
1998 年	16,108
1999 年	16,701
2000 年	16,723
2001 年	15,950
2002 年	15,945
2003 年	15,577

表 26 内航タンカーによる船型ごとのケミカル製品輸送量(6 月)

船種	船型	隻数	延航海数	総輸送量 kl	荷待ち及び 不稼動日数	1 隻当たり 荷待ち日数
一般 ケミカル船 205(千 m ³)	500 kl 積未満	25	230	80,867	135	5.4
	500 kl 積	68	666	289,708	327	4.8
	1,000 kl 積	106	1,041	862,436	501	4.7
	2,000 kl 積	8	79	92,070	37	4.6
	小計	207	2,016	1,325,081	999	4.8

船種の数値はのべカーゴタンクの体積を示す。

表 27 内航タンカーによる船型ごとのケミカル製品輸送量(12 月)

船種	船型	隻数	延航海数	総輸送量 kl	荷待ち及び 不稼動日数	1 隻当たり 荷待ち日数
一般 ケミカル船 205(千 m ³)	500 kl 積未満	19	220	67,917	101	5.3
	500 kl 積	73	723	325,375	261	3.6
	1,000 kl 積	116	1,274	1,078,346	353	3.0
	2,000 kl 積	7	67	103,806	36	5.1
	小計	215	2,284	1,575,444	751	3.5

船種の数値はのべカーゴタンクの体積を示す。

表 28 ケミカルタンカー輸送量の物質別内訳(2003 年 1~12 月)

No.	品名	輸送量		航海数		VOC の発生が 予想される物質
1	キシレン	2,511,415	17.3 %	2,547		×
2	ベンゼン	1,779,155	12.3 %	2,093		○
3	スチレン	1,321,313	9.1 %	1,511		×
4	メタノール	720,274	5.0 %	1,255		○
5	コールタール	663,249	4.6 %	737		×
6	トルエン	616,006	4.2 %	1,084		○
7	シクロヘキサノン	504,487	3.5 %	725		△
8	クレオソート	434,040	3.0 %	859		×
9	アクリロニトリル	363,449	2.5 %	746		△
10	ブタノール	283,676	2.0 %	421		△
	上位 10 品目	9,197,064	63.4 %	11,978	53.3 %	
11	メタクリル酸メチル	282,951	1.9 %	633		△
12	酢酸	225,654	1.6 %	367		×
13	ジクロロエタン	221,656	1.5 %	389		○
14	アセトン	208,325	1.4 %	266		○
15	エチレングリコール	207,630	1.4 %	380		×
16	酢酸ビニル	191,730	1.3 %	376		×
17	水酸化カリウム溶液	178,692	1.2 %	338		×
18	フェノール	164,450	1.1 %	122		×
19	エタノール	158,033	1.1 %	446		△
20	クメン	151,192	1.0 %	205		×
	上位 11~20 品目	1,990,313	13.7 %	3,522	15.7 %	
	その他 141 品目	2,256,897	15.6 %	4,987	22.2 %	
	品目コードにないもの	1,066,529	7.3 %	1,973	8.8 %	
	調査回答合計	14,510,803	100.0 %	22,460	100.0 %	

2004 年 3 月、ケミカル輸送実態調査より作成

VOC の発生が予測される物質、○はリード蒸気圧又は 37.8 °C における蒸気圧が 20 kPa 以上、△は 20 kPa 以下、×は水溶液又は蒸気圧が 1 以下のもの。

表 29 ケミカルタンカー輸送量の物質ごとと船型ごとの内訳

品目	船型(kl)	～500	500～ 750	750～ 1400	1400～ 1700	1700～	合計
キシレン	輸送数量	8,493	160,180	1,048,649	246,000	1,048,093	2,511,415
	総航海数	33	401	1,145	246	722	2,547
	積載率	63.91	60.00	71.97	63.19	70.20	69.38
ベンゼン	輸送数量	26,542	111,528	1,370,617	49,383	221,085	1,779,155
	総航海数	108	246	1,520	54	165	2,093
	積載率	77.03	70.56	71.62	59.98	62.88	70.04
スチレン	輸送数量	8,048	83,243	1,005,615	7,600	216,807	1,321,313
	総航海数	23	190	1,157	7	134	1,511
	積載率	87.23	66.44	69.30	67.27	73.96	69.91
品名のないもの	輸送数量	82,984	218,675	628,349	119,010	17,511	1,066,529
	総航海数	287	553	953	127	19	1,939
	積載率	78.50	63.36	54.43	59.75	48.53	57.95
メタノール	輸送数量	18,417	193,052	478,597		30,208	720,274
	総航海数	73	479	672		31	1,255
	積載率	63.78	60.65	62.10		48.25	61.02
コールタール	輸送数量	3,170	16,187	407,790	236,102		663,249
	総航海数	11	54	450	222		737
	積載率	72.05	49.96	78.30	71.57		74.73
トルエン	輸送数量	19,662	149,520	435,702	4,000	7,122	616,006
	総航海数	70	408	593	5	8	1,084
	積載率	69.30	55.77	59.88	49.57	39.17	58.65
シクロ ヘキサノン	輸送数量	3,671	84,329	340,471	11,015	65,001	504,487
	総航海数	13	200	450	12	50	725
	積載率	66.72	64.40	59.62	56.87	59.48	60.33
クレオソート	輸送数量	49,905	10,065	284,588	89,482		434,040
	総航海数	138	41	460	220		859
	積載率	90.41	40.91	53.39	27.40		46.20
アクリロ ニトロル	輸送数量	50,032	59,299	216,648	37,470		363,449
	総航海数	163	176	369	38		746
	積載率	73.88	54.02	50.62	61.63		54.55
ブタノール	輸送数量	3,000	33,458	171,399	61,680	14,139	283,676
	総航海数	15	96	231	66	13	421
	積載率	50.65	51.88	60.67	58.41	49.32	58.23
メタクリル酸 メチル	輸送数量	3,012	79,300	197,539	3,100		282,951
	総航海数	10	207	358	5		580
	積載率	72.07	60.65	46.36	38.61		49.72

ケミカル輸送実態調査より作成

船型クラスはタンク容量(kl)、輸送数量はトン。

「品名のないもの」とは、「予め選出した品目名リストにない貨物種の総計」である。未査定物質の輸送量とは異なる。

2.2.3 輸送オペレーション

(1) 輸送オペレーションに関する聞き取り調査結果

オペレータに対する聞き取りにより以下の実態が把握できた。

- ①ガスフリー作業は基本的にはサイトの指示に従って実施される。このため、同一荷種(前航海、次航海ともにガソリンが積み荷など)であっても、ガスフリー作業を実施する場合がある。実施要請は陸上の後背地に対する悪臭防止の観点から行われている場合が多いようである。また、積み荷が異なる場合(前航海荷種がガソリンであり今航海の荷種が軽油の場合など)は必ず実施されている。
- ②ナフサの荷積み作業では、既にベイパーリターンが実施されており、白油タンカーにおいては、ほとんどの船舶でベイパーリターン系のガスラインを使用した経験を有すると思われる。このため、専用のフランジが用意されており、取り外しも可能な状態にある船舶がほとんどである。ただし、今後規制が開始されれば、毎回接続が必要となるため、フランジの軽量化や、取り外し用のバーの設置が必要となる。
- ③油槽所によって、荷揚げ速度に制限があり、タンカーのカーゴポンプ定格値で作動していない場合がある。
- ④ケミカルタンカーでは、タンク満載容量の荷を積むことは少なく、500 kl タンクの半分程度の積み荷で運航を行うことも多くある。
- ⑤油面計が設置されている船舶では、基本的に検量は油面計の数値を基に算定されるべきであるが、ケミカル、白油ともに、荷主からのリクエストによりハッチを開放した上での検量も同時に行われる場合がある。

以上のことから、白油、ケミカルともに内航タンカーについては、ベイパーリターンのために ISOGOTT (OCIMF)規格に基づくリターンバルブ及びデフューザーが設置されているものと考えられる。一方、外航の原油、プロダクト及びケミカルタンカーに対しては、リターンバルブが設置されている例は極めて少ない。このため、内航タンカーについては、使用の経験もあることから、陸上側の施設整備が行われれば、実施に際しての問題は大きくないと考えられる。

また、現在同一荷種が搭載される場合にも実施されているガスフリー作業も、VOC 処理が実施されれば省略できる可能性もあり、むしろ省力化に進む可能性もある。ガスフリー作業の頻度が高くなれば、東京湾や大阪湾など比較的狭い海域から海上での放出量が大幅に大きくなる可能性もあることから、その頻度についてはさらに実態を把握する必要があると考えられる。

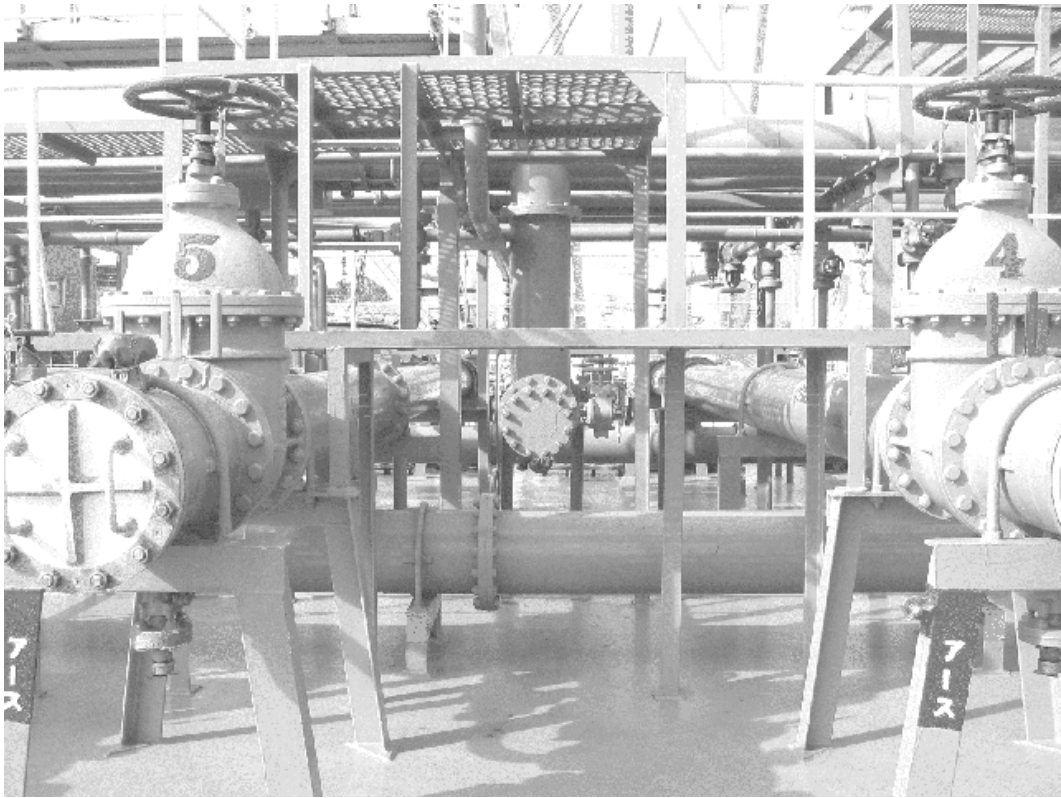


図 22 ベイパーリターン用パイプ(2,000kl 積みタンカーの例)

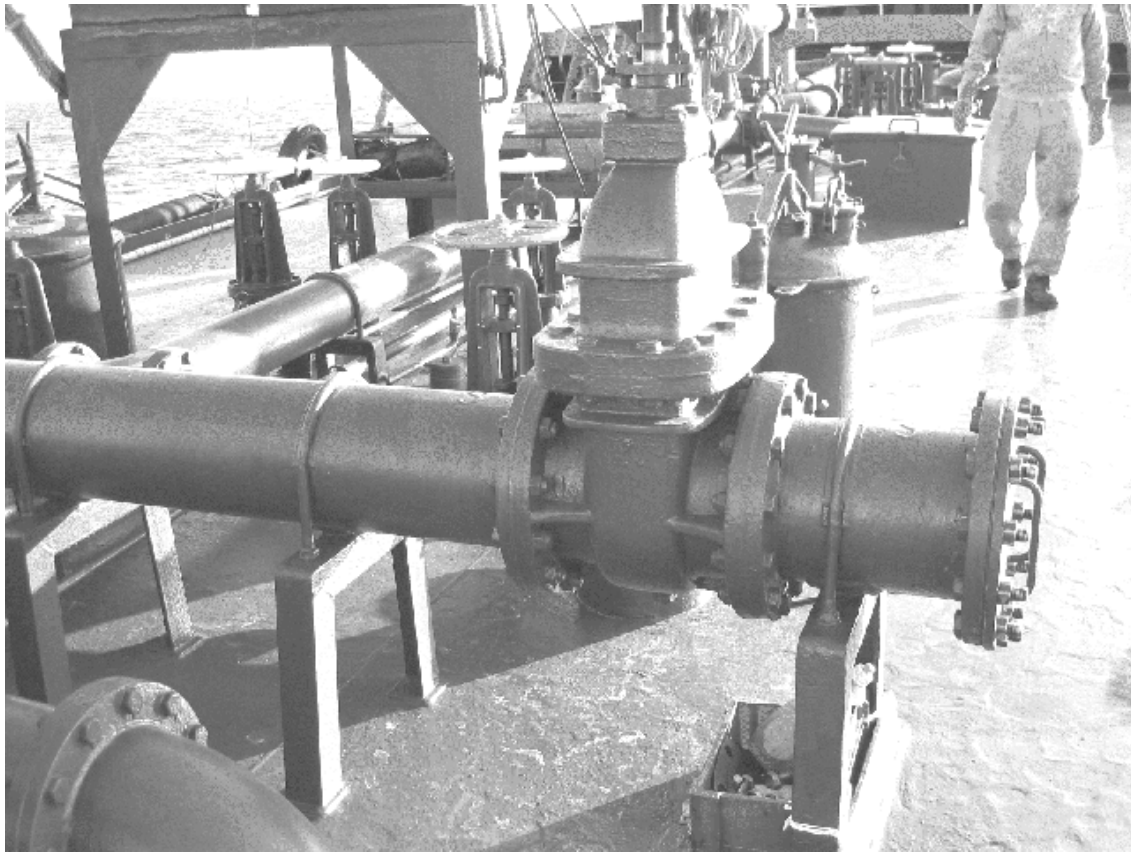


図 23 ベイパーリターン用パイプ(1,000kl 積みタンカーの例)

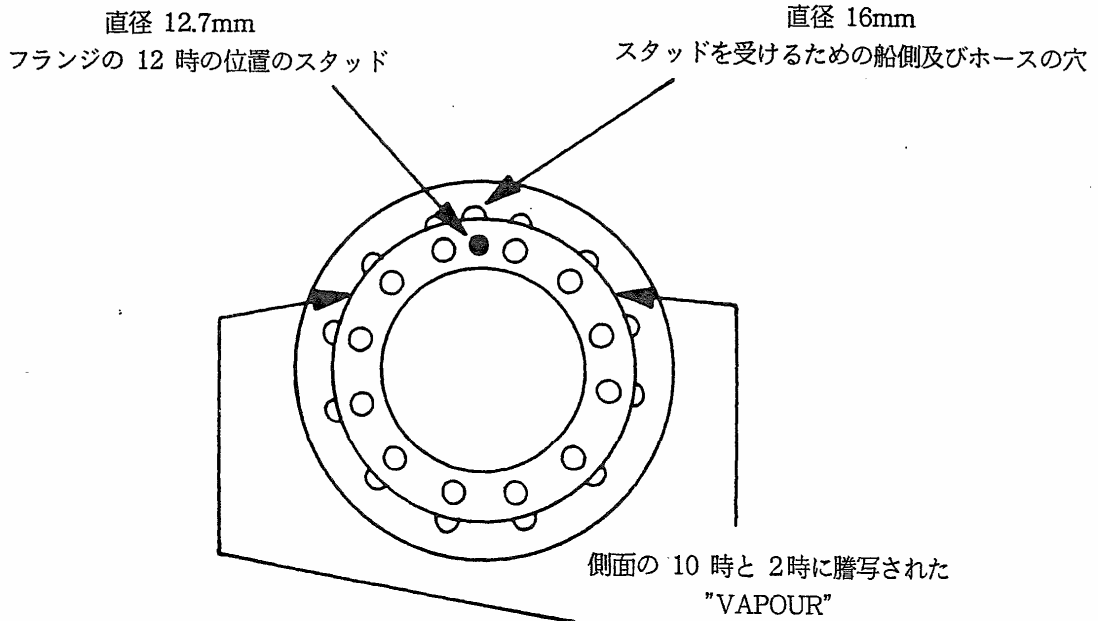
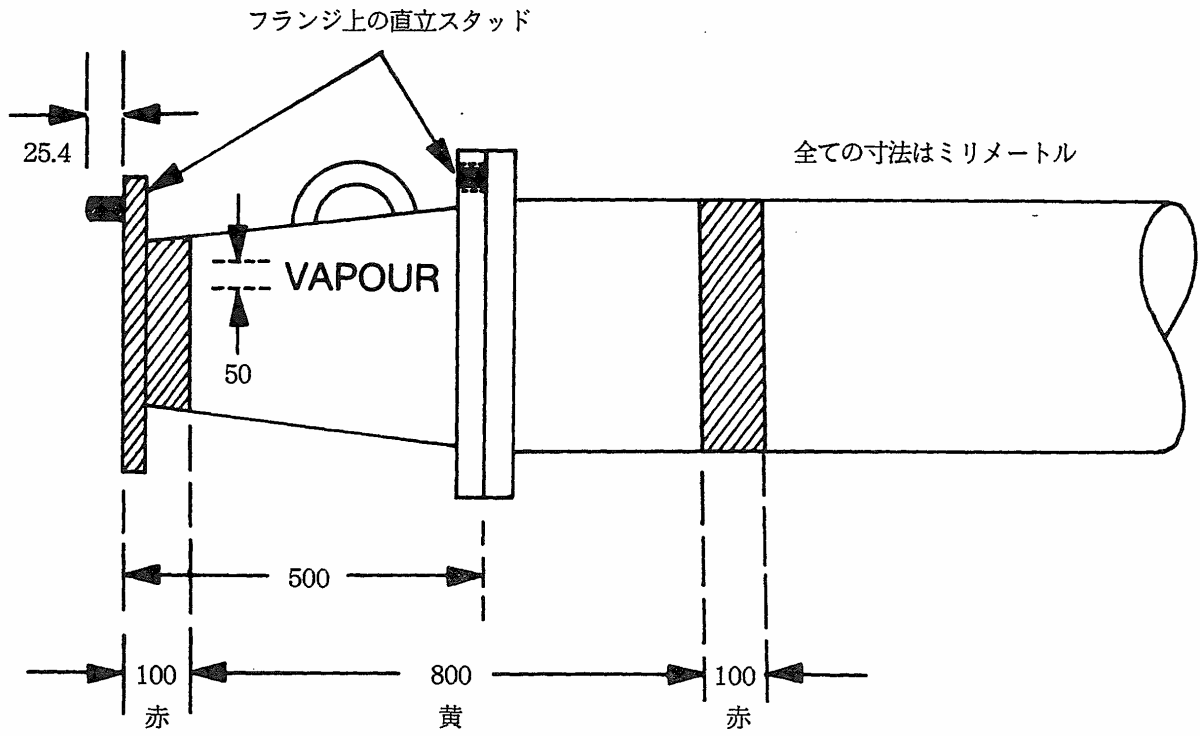


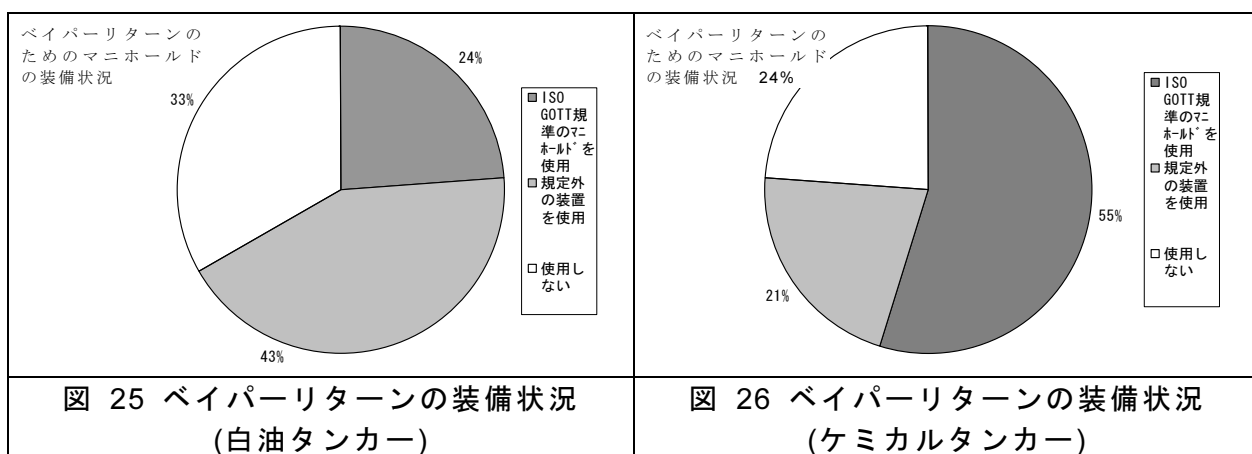
図 24 ベイパーリターン用パイプの規格 (ISOGOTT 規格)

(2) アンケート調査結果

(1)に基づき、内航タンカーを対象にして、アンケート調査を全隻対象に実施した。白油タンカー400隻のうち117隻、ケミカルタンカー196隻のうち40隻からの回答があった。

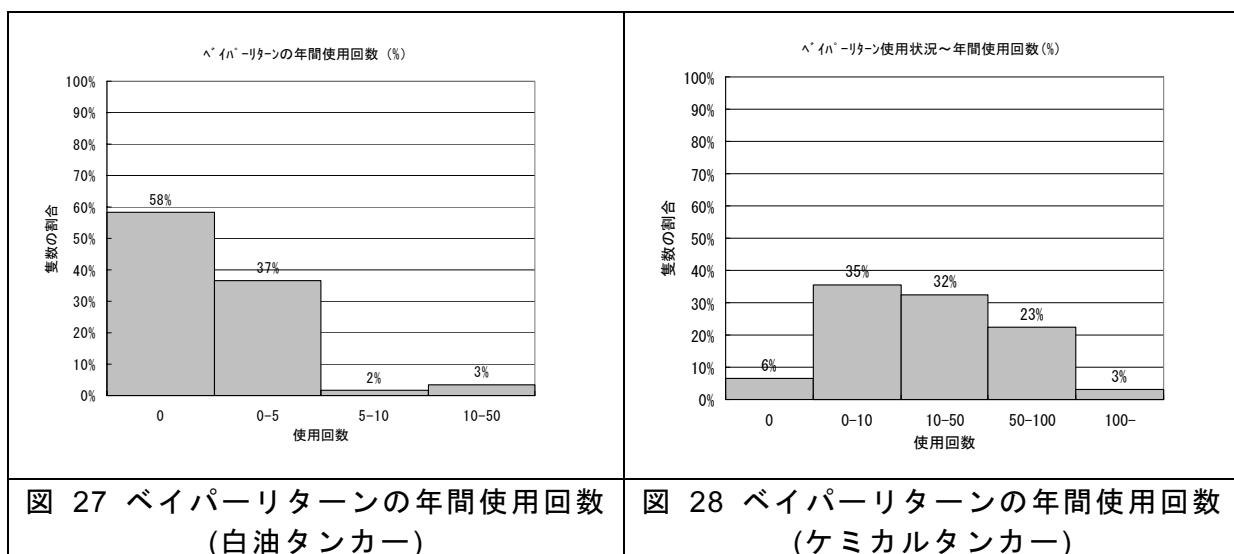
(a) ベイパーリターン装置の装備状況

図24に示したISO GOTT規格のガスリターン系及びマニホールド及び規格外のガスリターン系装置を装備している船舶の割合を図25及び図26に示した。それぞれ、70%程度及び75%程度のタンカーはガスリターン系を装備している。将来的には、マニホールド部の変更など小規模な改造で対応できるものと考えられる。



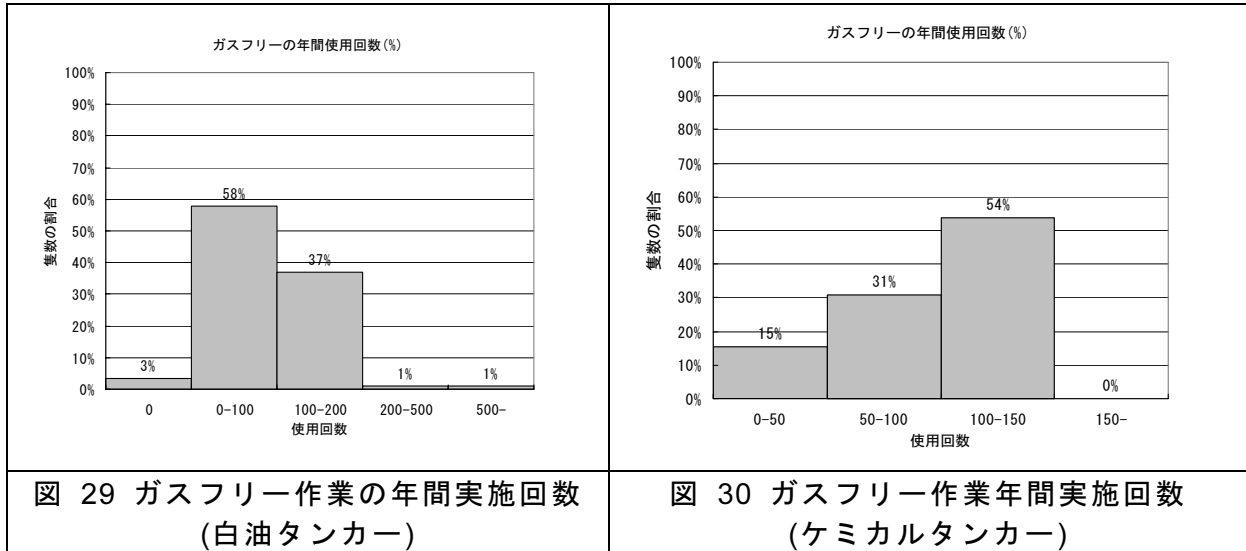
(b) ベイパーリターン作業の実施状況

ベイパーリターン装置を用いて、ガスリターン作業を実施した年間回数を図27及び図28に示した。白油タンカーでは、60%程度が使用経験を有していないが、有害物質などを用いるケミカルタンカーでは、90%以上のタンカーが使用経験を有していることがわかる。



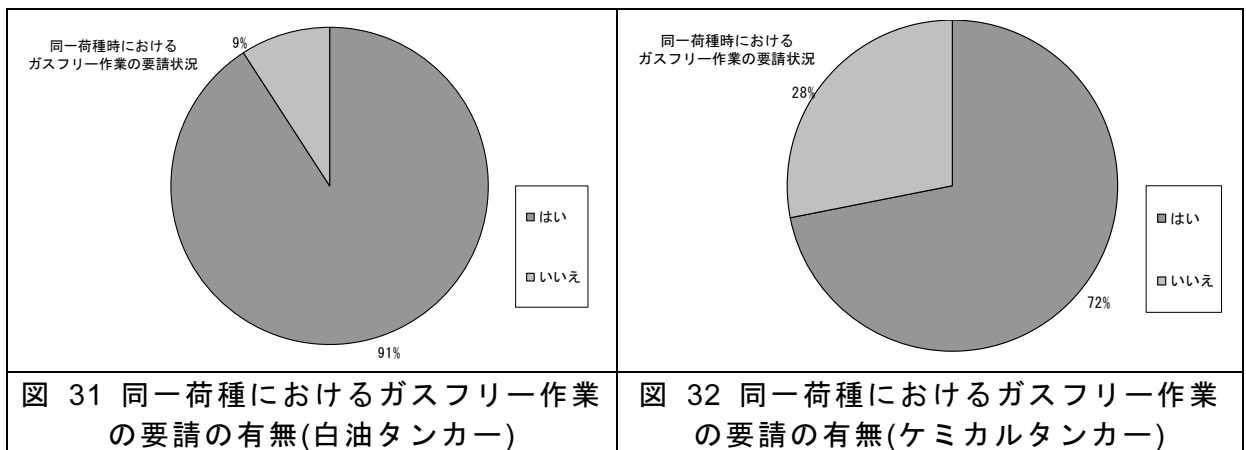
(c) ガスフリー作業の実施状況

ガスフリー作業の実施状況として、年間のガスフリー実施回数を図 29 及び図 30 に示した。白油タンカーは年間 100 回までのガスフリー作業を実施しており、ケミカルタンカーではそれよりやや多い 150 回までの作業を実施している。両者の差異は、全く異なる荷種を航海ごとに運搬するケミカルタンカーの実態を表していると考えられる。



(d) ガスフリー作業の要請状況

荷主サイドからの、同じ荷種であってもガスフリー作業の要請の有無を尋ねた。多くの船舶は要請を受けた経験があり、特にガソリンについては VOC 対策を考慮した総合的な判断と統一基準を今後制定することも考えられる。



(e) タンク容量に対する荷積み量の状況

スペック上の満載タンク容量に対して、どの程度の燃料量を運搬することが多いか、年間に最も荷積みを行う事業所での年間平均荷積み量を訊ねた。白油タンカーでは、80 %以上のタンクを満載にしていることが多いのに対して、ケミカルタンカーでは 60 %以上が最頻値となっており、聞き取り調査で得られたタンクを満載にしないで運搬する小口輸送が多いことが裏付けられた。

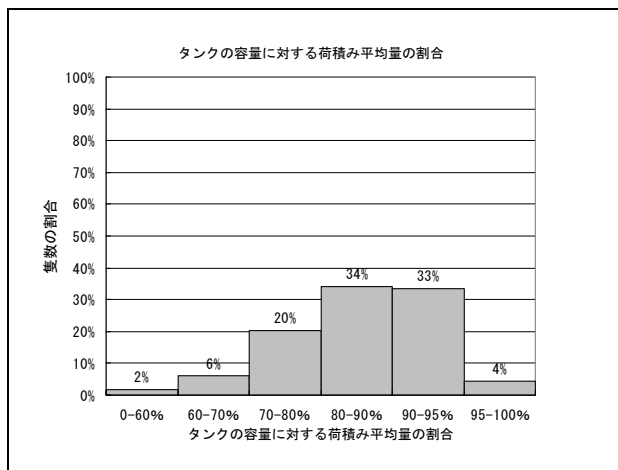


図 33 タンク容量に対する年間平均荷積み量の割合(白油タンカー)

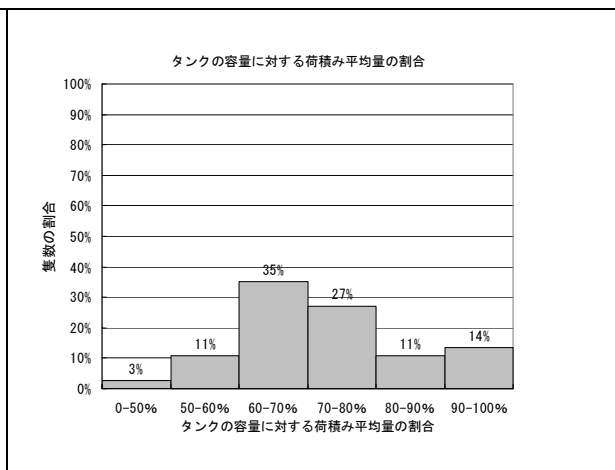


図 34 タンク容量に対する年間平均荷積み量の割合(ケミカルタンカー)

(f) 荷役速度の状況

荷積みと荷揚げのそれぞれの荷役速度を訊ねた。ガソリンは 500-1000 kl/時間が荷揚げ荷積みとも最も多く、ケミカルタンカーでは荷役装置が小型なこともあり、100-200 kl/時間の速度が多くなっている。

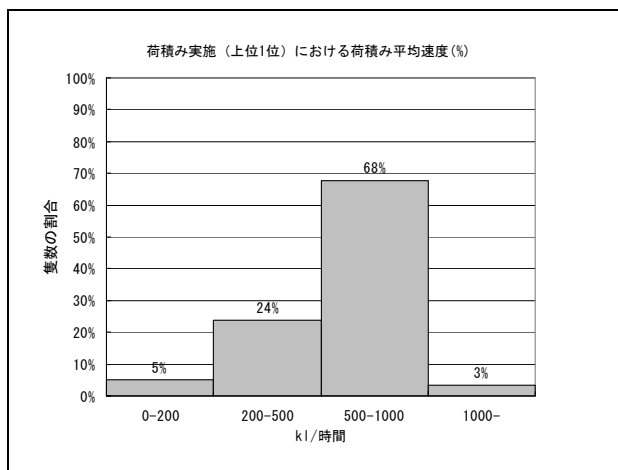


図 35 荷積み時の平均荷役速度 (白油タンカー)

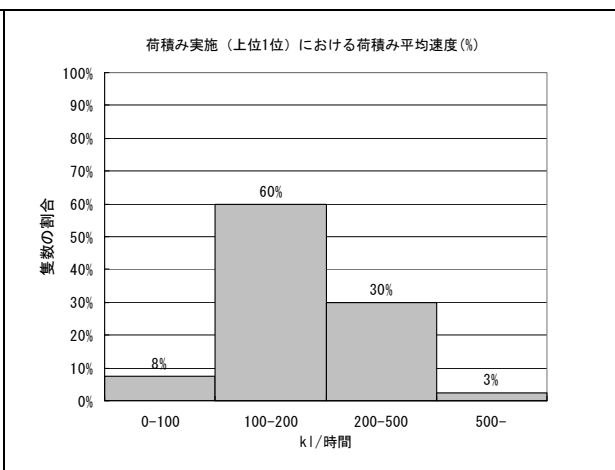


図 36 荷積み時の平均荷役速度 (ケミカルタンカー)

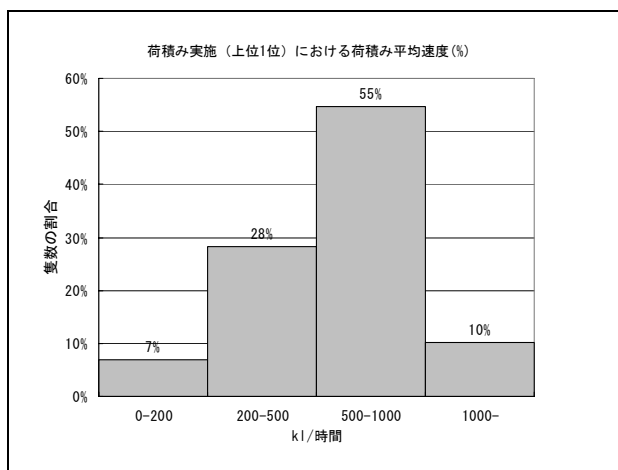


図 37 荷揚げ時の平均荷役速度 (白油タンカー)

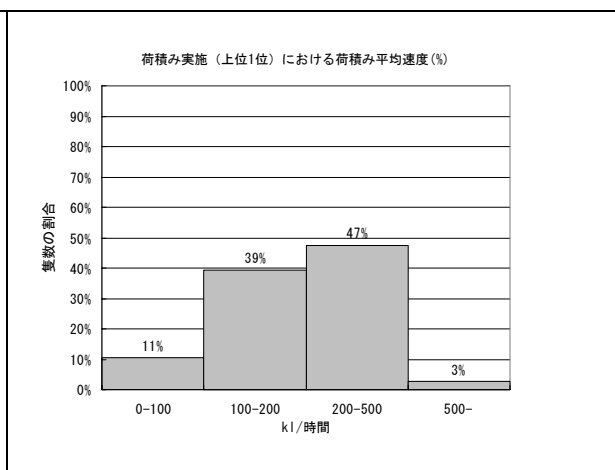


図 38 荷揚げ時の平均荷役速度(ケミカルタンカー)

2.4 VOC 発生量に関する試算

統計量に基づく荷種ごとの輸送量及び荷種ごとの排出係数から、VOC 排出量を算定した結果を表 30 に示した。船舶全体からの排出量は 1.2 万トンであり、これは陸上からの排出量約 150 万トンの 0.9 %に当たる。

また、ガソリンスタンド及び製油所からの排出量と、船舶による燃料輸送の排出量と比較すると後者は前者の 12 %に当たる。

表 30 平成 15 年における船舶からの VOC 排出量

		輸送量ト	排出係数kg/t	排出量 Mt/年	備考
ガソリン荷役 起源のVOC	<1000	3,855,707	0.086	1,080	油槽船船腹量調査のオペレーター ケート調査より推定。 RVP>20 kPa以上の荷種のみを選 定。
	≥1000	19,673,155	0.122	5,508	
原油荷役起源のVOC		33,960,076	0.14	4,754	港湾統計の移出量(国内輸送)
ケミカル荷役起源のVOC					油槽船船腹量調査のオペレーター ケート調査より推定。RVP>20 kPa 以上の荷種のみを選定。
ベンゼン		1,559,429	0.011	17	
メタノール		571,177	0.006	3	
トルエン		534,016	0.004	2	
ジクロロエタン		277,070	0.016	4	
アセトン		164,785	0.023	4	
船舶からの排出量 合計				11,387	
排ガス中のVOC排出量 *1				15,340	
(参考)					
陸上からの排出量 *2				1,504,164	
うち燃料経由				59,560	油槽所、製油所及びガソリンスタ ンドからの排出を含む。

*1 排ガス中の VOC 排出量は、外航船、内航船を含む全船舶の EEZ 内での排出量
(当財団、平成 13 年度船舶排ガスの環境への影響と排出抑制に関する総合的調査報告書)
(なお漁船、プレジャーボートを含めた総 VOC 排出量は、33,178 トン/年計算される。)

*2 陸上からの排出は、社団法人 環境情報科学センター平成 14 年度「揮発性有機化合
物(VOC)排出に関する調査報告書～VOC 排出インベントリ～より」作成。

2.5 船舶及び陸上からの VOC 排出に対する規制動向調査

文献調査などにより船舶起源の VOC 排出に対する規制動向について情報を収集整理した。船舶起源の VOC 排出に対する規制事例が少ないことから、陸上のタンクローリー車およびタンク車への積み出し施設に対する規制も対象とした。

IMO が定める MARPOL 73/78 条約附属書 VI は 2005 年 5 月 19 日に発効した。IMO 事務局に聞き取りを行ったところ、条約に基づき VOC 規制港湾の指定を通告してきた国は現時点ではないとのことであった(デンマークからは自国内に外航船を対象にした規制港湾が存在しないとの報告あり)。つまり、現時点では表 34 に示す規制対象となった陸上施設を利用する船舶については、条約の通告義務の対象外となる内航船が対象であるか、米国のようにもともと附属書 VI を批准していない国であるため通告義務がないと解釈できる。

2005 年 7 月に開催された MEPC53(海洋環境保護委員会)においては、附属書 VI の発効に伴い現附属書の見直し作業についての議論が行われた。この中では、Norway 及びイギリスから、現在規制の枠組みしか用意されていない VOC について、具体的な排出規制値を特に原油、ガソリン、有害性の高いケミカルカーゴについて、検討するべきであるとの提案がなされ、EU 諸国が賛同を示した。このため、同会合の大气汚染に関するワーキンググループにおける議論で、NO_x、SO_x に加えて VOC 及び PM 規制の可否について検討作業を開始することに合意した。これらの検討作業は、2007 年までに終了することを目途に BLG(液体ガスバラ積み小委員会)に対して付託された(表 32 参照)。

また、2006 年 3 月に開催された MEPC54 においては、附属書 VI の改正作業に先立ち、VOC 規制港湾の指定を IMO に通告する義務があることを周知徹底させるための事務局提案(MEPC54/4/8)に基づき回章ドラフト案を検討し、MEPC54/WP.7/Rev 1 の Annex 2(表 33 参照)が MEPC として合意された(4 月以降に正式に事務局から MEPC 決議文章として回章される)。

同会合においては、ボランティアベースでは外航タンカーに対して排出抑制対策が行われている例が増えていることが報告されたが、条約に基づく規制港湾および近い将来の指定予定が出席国内にはないことが確認された。また、自国の港及びターミナルに VOC 排出規制を導入する場合、報告の対象を港湾名のみとするのか、港湾における VOC 制御装置(バース側に設置および使用が要求される VOC 制御装置、船上に設置及び使用が要求される VOC 収集装置に分かれている)を含めて報告の必要性があるかについて議論が行われ、VOC 制御装置の設置を判断基準とすることが確認された。また、VOC 制御装置の技術開発状況や使用方法についての情報も回覧において求めることとなった。

諸外国において、液体貨物の出荷施設からの VOC 発生に対して規制を行っている例を表 34 に示した。陸上船舶を問わず、受入ロスに関しては、ガソリン及び原油などリード蒸気圧が高い燃料種を中心に既に規制が行われている。特に米国においては、①日本と同様にオキシダントの大気環境状況が劣悪であるカリフォルニア州 及び ②製油所が多く存在し船舶への荷積みの盛んなテキサス州において、既に船舶に対する VOC 規制が実施されている。

機器メーカーへの聞き取りによれば、米国西海岸を中心に、60 基程度の VOC 処理装置が現在設置稼動しており、主に燃焼処理装置が占めている。また、ガスフリー作業用に可搬式の処理装置も実用化されている。

また、欧州においては Council Directive 94/63/EC に基づき、内航船を荷役対象とした出荷施設に対して既に規制が行われている。また、北海周辺を中心に国内法においては外航タンカーを規制対象にする法案が既に整備されているが、現状ではボランティアベースの規制に留まっているとのことだった。

特に EU については、現在 MARPOL 73/78 条約より厳しい SOx 対策案が船舶に対して提案されており、さらに荷役時に発生する VOC についても 2005 年までに対策を提案するとされているが、EU 担当者への聞き取りによれば、今回の VI 付属書改正に伴い、NOx 規制内容が決まるまでは、EU 委員会としての VOC 規制案の検討は行ない見込みであるとのことであった。

大型ディーゼル機関の排出ガスに関しては、米国 EPA の大気清浄法に基づく基準¹² などにおいて、NOx+HC を一つの排出指標として取り扱う考え方が、小型機関から適用されつつあり、40CFR PART 94 において 1 シリンダー当たり 30 リットル未満の中小型機関については、HC 対策が実際に導入されている。2007 年に規制値案が公表される予定の大型機関についても同様の VOC(ここでは未燃 HC と同義である)に対して規制値が設けられるものと考えられる。この規制にあわせて、従来は実態が把握されていない船舶機関、特に低質燃料使用時におけるメタンを含めた VOC 排出レベルに関する情報が増加することが期待できる。

その他、米国エクソン社のバルディーズ原油積み出し基地においては、カーゴタンクからの VOC 排出に加えてシングルハルタンカーの Dirty Ballast を処理する際に発生する VOC を含めて処理を行う施設を有していることが、聞き取り調査などにより解った。同基地においては、1998 年にタンカーへの受け入れロス処理を目的に、船舶からのベイパーリターンパイプラインを設置し、専用の焼却炉 3 基を設置したものである。陸上の原油タンクからのベントラインとも接続されており、陸上タンクの浮き屋根式及び船舶カーゴタンクへの移送の際の圧力制御への変更と同時に設置されている。発生したベイパーは、一部所内熱発生用のボイラーに用いられる他、

¹² 連邦の大気清浄法 CFR(Code of Federal Resister)として整備されている。

専用の焼却炉で処理されている。



Figure 5: power boiler stack (left), three incinerator stacks (right)

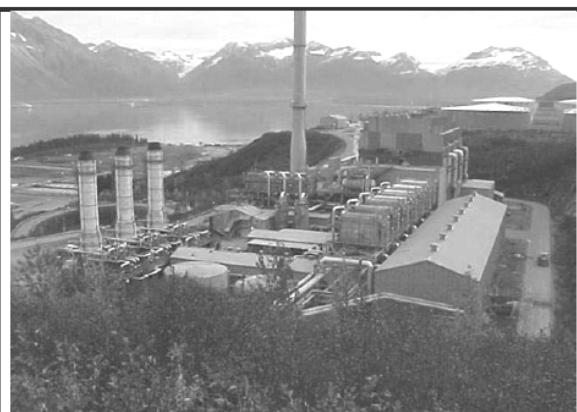


Figure 6: power boiler stack and boiler facility (right), view from hill top⁵

図 39 バルディーズ原油基地に設置された VOC 処理装置

表 31 米国アラスカ州バルディーズ基地における VOC 対策の効果

VOC対策前の状況(1995年)						
Combustion Equipment	SO ₂	NO _x	CO	PM10	VOC	Total
Power Boilers	1,195	529	3	54	457	2,238
Waste Gas Incinerators	465	647	49	197	2,170	3,528
Solid Waste Incinerator	12	5	17	15	5	54
Emergency Equipment (1)	3	37	6	3	2	51
Combustion Equipment Subtotal	1,675	1,218	75	269	2,634	5,871
Ship Vent Gas	45	113			5,940	6,098
East/West Tank Farm					165	165
Fuel Oil Tanks					1	1
BWTF/90's Tanks					727	727
BWTF/80's Tanks					9	9
BWTF Dissolved Air Flotation (DAF) cells					87	87
BWTF Biological Treatment Tanks (BTT)					12	12
Leaking Valves and Fittings on VRS Pipes					166	166
Non-Combustion Equipment Subtotal	45	113	0	0	7,107	7,265
Total	1,720	1,331	75	269	9,742	13,137

対策後(2002年)	SO _x	NO _x	CO	PM10	VOC	Total
2001年のTotal Emissions Post Tanker Vapor Recovery	1,720	1,331	75	269	9,742	13,137
Reduction in Uncontrolled Loading Required					4,540	4,540
Increase Due to 2000 Permit	21	10	1	1	24	57
Revised Allowable Permit Limits as of 2002	1,741	1,341	76	270	5,226	8,654

2002年におけるVOCの排出削減量は37,332トン、86%程度の削減率と推定される。年間の原油取扱量が増えたため、未対策時のVOC排出量は表中1995年の9742トンから大きく増加しているためである。米国では、排出量を前年比での比較で検討するため、長期にわたり規制が積み重ねられていると、全く未規制の場合の排出量は、推定値でしか示せないことが多い。

ANNEX 14

**TERMS OF REFERENCE FOR THE BLG SUB-COMMITTEE ON THE REVISION
OF MARPOL ANNEX VI AND THE NO_x TECHNICAL CODE**

- 1 The BLG Sub-Committee is instructed to:
 - .1 examine available and developing techniques for reduction of emission of airpollutants;
 - .2 review the relevant technologies and potential for reduction of NO_x, and recommend future limits of NO_x emission;
 - .3 review technology and the need for reduction of SO_x, justify and recommend future limits of SO_x emission;
 - .4 review the technology and potential for reduction of VOC;
 - .5 with a view to controlling emissions of particulate matter (PM), study currentemission levels of PM from marine engines, including their size distribution,quantity, and recommend actions to be taken for the reduction of PM from ships.Since reduction of NO_x and SO_x emission is expected to also reduce PM emission,estimate the level of PM emission reduction through this route;
 - .6 consider reducing NO_x and PM limits for existing engines;
 - .7 consider whether Annex VI emission reductions or limitations should be expandedto include diesel engines that use alternative fuels and engine systems/power plants other than diesel engines;
 - .8 review the texts of Annex VI, NO_x Technical Code and related guidelines and recommend necessary amendments.
- 2 The BLG Sub-Committee should complete its work on the above by 2007.

ANNEX 2

Draft MEPC/Circ.[...]

**NOTIFICATION TO THE ORGANIZATION ON PORTS OR TERMINALS
WHERE VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS (VOCs) EMISSIONS
ARE TO BE REGULATED**

1 The Marine Environment Protection Committee at its fifty-fourth session held from 20 to 24 March 2006, considered the provisions of regulation 15 of MARPOL Annex VI on Volatile Organic Compounds (VOCs). Recognizing that MARPOL Annex VI entered into force on 19 May 2005 and that only one Member Government has so far notified the Organization with the information that none of its ports and terminals had such regulations in place.

2 The Government of each Party to the 1997 Protocol which designates ports or terminals at which VOCs emissions are to be regulated shall ensure that shore-based vapour emission control systems, approved by that Government taking into account Standards for Vapour Emission Control systems (issued as MSC/Circ.585), are operated safely and in a manner so as to avoid undue delay to ships.

3 The Committee noted that regulation 15 of MARPOL Annex VI requires Parties to the 1997 Protocol to inform the Organization of their intention to introduce requirements for the use of vapour emission control systems and to notify the Organization of ports and terminals under their jurisdiction where such requirements are already in force. This notification shall include information on the size of tankers to be controlled, on cargoes requiring vapour emission control systems, and the effective date of such control. The notification shall be submitted at least six months before the effective date.

4 The Committee further noted that many terminals are implementing or operating such practices without the Parties to the 1997 Protocol fulfilling their obligation to notify the Organization. The Committee shared the concern that, since there is no circulation of such information, it is difficult for owners and operators to prepare for these changes at ports and terminals.

5 Parties to the 1997 Protocol are required to notify the Organization without delay with information on ports and terminals under its jurisdiction at which VOCs emissions are or will be regulated, and requirements imposed on ships calling at these ports and terminals.

6 With the aim of promoting full utilization of vapour emission control systems in ports and terminals, any information received by the Organization on the availability of vapour emission control systems will be circulated through MEPC circulars so that owners and operators will have up-to-date information on current and future requirements for the utilization of vapour emission control systems.

表 34 燃料出荷施設に対する各国の VOC 規制内容

国及び地域	船舶への荷役作業が規制対象	規制対象 (対象施設及び対象燃料の除外規定)	規制内容	IMO MARPOL 附属書 VI との関係
米国連邦 (NSPS,40CFR Part 60. Subpart XX—Standards of Performance for Bulk Gasoline Terminals)	×	全米。ガソリンタンクローリー(タンクローリー車)に対し、ガソリンのばら積み供給作業を行う施設(ガソリン出荷量が 75,700 リットル/日以上)のガソリンの規定は ASTM による。	a) タンクローリー車の受け入れロスを回収する装置を施設側に設置していること。 (b) 回収装置からの大気排出量は 35 mg TOC/ガソリン供給 l (TOC; Total Organic Carbon ガソリンの場合 VOC と同意) (c) 既設は 80 mg/l(d) 回収装置が作動中に他の供給ラインからの漏れがないこと (e) タンクローリー車に搭載されたタンクにおいて、急激な内部圧力変化(5 分間で 750 から 4,500 Pa まで変化)を与えた場合に、タンクからの漏洩がないこと。 (f) 回収装置に適したタンクローリーに対してのみ燃料供給を行うこと。	国内陸上施設のため必要なし。
(NSPS,40CFR Part 63. Subpart XX—Standards of Performance for Crude Oil Terminals)	○	全米。有害大気汚染物質(BTX、イソオクタンなど)の大気への排出量が、1 t/y 以上ある新規海上出荷施設。	作成中	作成中
米国連邦 (NSPS,40CFR Part 68.410)	○	全米。有害大気汚染物質(BTX、イソオクタンなど)の大気への排出量が、1 t/y 以上ある新規海上出荷施設。	MACT(Maximum Available Control technology 最大限実施可能な汚染防止技術)を求める。具体的な条件としては、ターミナル全体で平均 93 % の排出削減か、98 % 以上の削減効果のある燃焼装置もしくは 95 % 以上の回収効率(もしくは排気中のガソリン蒸気が 1000 ppm 以下)の回収装置を設置。	米国は附属書 VI を批准していない(2005 年 1 月現在)

国及び地域	船舶への荷役作業が規制対象	規制対象 (対象施設及び対象燃料の除外規定)	規制内容	IMO MARPOL 附属書VIとの関係
米国カリフォルニア州 BAAQMD (REGULATION 8,RULE 44)	○	石油系燃料(ガソリン、ガソリン系燃料、航空ガソリン、原油)の荷役のみが対象。 年間の荷役量が 159,000 m ³ 未満のふ頭及び全てのふ頭における一回当たりの 159 m ³ 未満の荷役作業は除外。	以下の2点のいずれかを満たさない限りタンカーへの荷役ができない。 (1)大気への放出量を 5.7 g/m ³ 荷役量を超えないこと、(2)大気へ放出される VOC 量を最低 95 %以上削減すること。	米国は附属書VIを批准していない(2005年1月現在)
米国カリフォルニア州 SCAQMD (RULE 1142)	○	石油系燃料(ガソリン、ガソリン系燃料、航空ガソリン、原油)の荷役のみが対象。 ふ頭の取扱量による除外規定はなし、前面海域(港湾区域より広い)内の海上における全ての排出が対象(海域内であればガスフリー作業やイナーテイニング作業も対象と明記)	以下の2点のいずれかを満たさない限りタンカーへの荷役ができない。 (1)大気への放出量を 5.7 g/m ³ 荷役量を超えないこと、(2)大気へ放出される VOC 量を最低 95 %以上削減すること。	米国は附属書VIを批准していない(2005年1月現在)
米国テキサス州 Texas Administrative Code Title30, Part1, Capter115, SubchapterF	○	Beaumont/Port Arthur, Dallas/Fort Worth, El Paso, and Houston/Galveston 地域内のふ頭(陸上の100万ガロン未満のタンク及び42万ガロン未満の積載量を持つタンカーへの荷役は除外)。 船舶の規定はガソリンのみが対象。	船舶のタンクに対してガソリンの荷役を行う場合、陸上タンクへのベイパーリターンを設置し、確実に接続しなければいけない。 90 %以上の削減率を持つ VOC 処理装置を通さない限り VOC を大気中に排出できない	米国は附属書VIを批准していない(2005年1月現在)
台湾 大気汚染防止法令 39 条	○	揮発性有機化合物の重量百分率が 10 %以上の液体 (年間の積出し量が 1,500 m ³ 未満のもの、また年間の積出し量が 10,000 m ³ 未満の積込みと積出し操作時の実蒸気圧が 210 mmHg 未満のものは除外)	蒸気回収系を設け、下記の汚染防止施設の内1つに接続すること。 1. ボイラ又は加熱炉の燃焼室 2. 汚染防止設備を有するタンク 3. 揮発性有機化合物の削減率(R)が 90 %以上又は排出濃度(C)が 200 ppm 以下の汚染防止設備	IMO など国連機関への加盟をしていない
韓国	×	貯油所(出荷施設)は全て対象。 原油、ガソリン、ナフサが、VOCとして規定されている	リーク率での規定(貯蔵量の 0.5 %以下荷役量の 2 %以下とする)及び施設要件がある。	韓国は附属書VIを批准していない(2005年1月現在)

国及び地域	船舶への荷役作業が規制対象	規制対象 (対象施設及び対象燃料の除外規定)	規制内容	IMO MARPOL 附属書VIとの関係
EU Council Directive 94/63/EC	○	リード蒸気圧が 27.6 kPa 以上の石油から製造され自動車用の燃料として用いられる液体燃料(LPG を除く)を取り扱う荷役施設 船舶の規制対象は河川など内陸水面を航行する船舶(Council Directive 82/714/EEC において定義される inland waterway vessel)。船舶向け出荷施設のうち、規制対象は、取扱量 25 000 t/year 以上の施設のみ。	燃焼装置からの排出量は 35 g/Nm ³ を超えないこと。 オーストリア、ベルギー、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、アイスランド、アイルランド、イタリア、リヒテンシュタイン、ルクセンブルク、ネザールランド、ノルウェー、ポルトガル、スペイン、スウェーデン、イギリスにおいて、同指令に基づき国内法が立法化されている。また、同 EU 指令の規制を上乗せ規制として、イギリス、ノルウェーのように、左記規制対象船舶以外(international vessel)に拡大している国もある。	EU 諸国のうちキプロス、デンマーク、ドイツ、ギリシャ、ノルウェー、スペイン、スウェーデン、イギリスが 2005 年 1 月現在批准しているが、VOC 規制港湾指定の通告は、2004 年 12 月段階でなし。
EU Council Directive 1999/13/EC	×	-(石油類貯蔵施設は規制対象外)	-	国内陸上施設のため関係なし。
日本 大気汚染防止法の改正	×	揮発性の気体を発生させる発生源は全て規制対象となる方向で検討が進められており、陸上の貯蔵施設は規制対象となる模様。	一定規模以上の貯蔵施設に対して濃度規制が想定される。	国内陸上施設のため関係なし。
日本 海防法の改正	○	揮発性物質放出規制港湾として指定を受けた港湾における荷役。燃料種、総トン数などの対象区分は未定であるが、外航船が対象になると予想される。	放出防止設備の設置(具体的な内容については未定)	批准済み
日本 神奈川県生活環境の保全等に関する条例	×	タンク車又はタンクローリーに、原油、揮発油、ナフサを給油する油槽所(貯蔵施設の容量が合計で 1,000 キロリットル以上であるものに限る。)又は製油所に設置される出荷施設に限る。	炭化水素系物質の排出口における濃度が 8 vol%以下、又はベイパー除去率が 80 %以上である排出防止装置の設置。	国内陸上施設のため関係なし。

国及び地域	船舶への 荷役作業が 規制対象	規制対象 (対象施設及び対象燃料の除外規定)	規制内容	IMO MARPOL 附属書VIとの 関係
大阪府生活環境の 保全などに関する 条例	×	タンク車又はタンクローリーに対するガソリン 出荷施設。	薬液による吸収式処理装置又はこれと同 等以上の性能を有する処理装置を設 置し、適正に稼動させること。	国内陸上施設 のため関係な し。
京都府環境を守り 育てる条例	×	タンクローリーにガソリンを積み込む出荷施設	タンクローリーと直結するペイパーリ ターン装置の設置もしくはペイパー 処理装置の設置	国内陸上施設 のため関係な し。
大分県生活環境の 保全等に関する条 例	×	タンクローリーに対する揮発油出荷施設。	炭化水素系物質の排出口における濃度 が 8 vol%以下、又はペイパー除去率 が 80 %以上である排出防止装置の設置。	国内陸上施設 のため関係な し。
横浜市	×	車両への炭化水素系物質の最大出荷量が0.54 kl/ 日以上の出荷施設。	炭化水素系物質の排出口における濃度 が 5 vol%以下、又はペイパー除去率 が 90 %以上である排出防止装置の設置。	国内陸上施設 のため関係な し。

米国 EPA ホームページ、英国 EHSNI ホームページ、EU の環境関連ホームページ、環境省資料などから作成。

2.6 船舶からの VOC 排出対策技術の動向調査

2.6.1 陸上における VOC 排出対策技術の紹介

陸上における VOC 処理技術として、環境省資料などにおいては①冷却凝集法、②直接燃焼法、③触媒燃焼法、④蓄熱燃焼法、⑤溶剤回収法、⑥膜分離法、⑦吸着法があげられている。1.章の実測結果から明らかなように、荷役時の VOC 濃度は数 ppmC～40%C と 10 万倍程度の濃度差があり、陸上施設の適用については、この点への適用が重要なポイントとなる。

(1) 冷却凝縮法とその適用

冷却凝縮法とは、冷却装置(以下「冷却回収装置」)に VOC を含む排ガスを通すことにより、露点以下に冷却して VOC を回収する方法である。単一の VOC が使用されており、排ガス風量が少なく、VOC 濃度が高い場合に適用されることが多い。冷却回収装置の特徴を表 35 に示す。

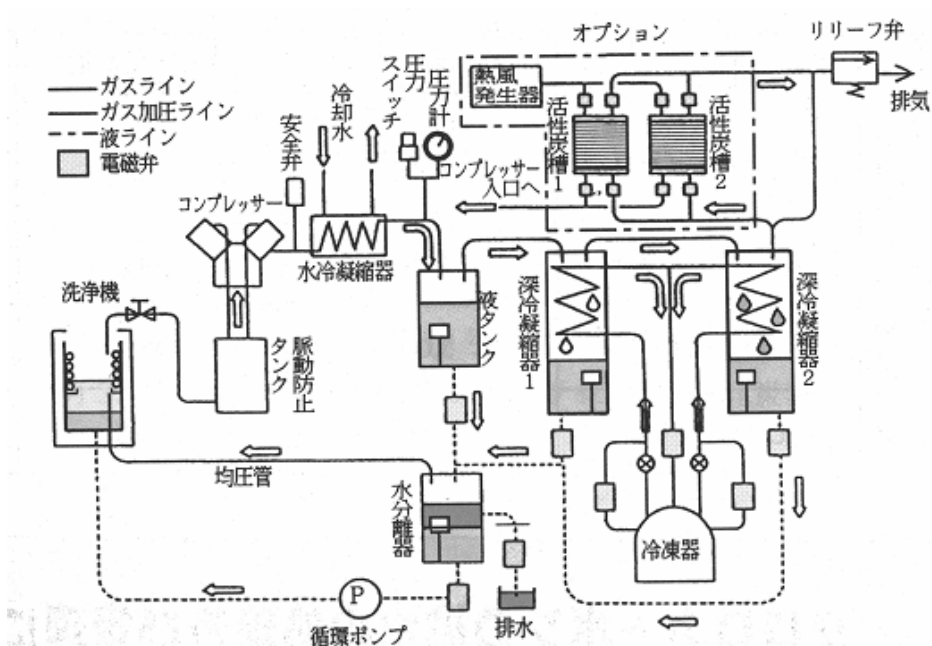
除去効率は他の方法に比べて高くないが、非常に高濃度の物質の除去には有効である。排ガスから回収した物質を再利用する目的で行われることがあり、再利用する場合は、回収後に蒸留などの処理を行うこともある。

ガソリン荷役起源の VOC に使用する場合は、その蒸気圧から圧縮深冷凝縮法が原理的には適用可能であるが、例示でわかるようにフロン類など冷媒の回収に用いられる技術であり、海外ではケミカル貨物について適用事例があるが、国内では陸上向け出荷施設を含めて液体貨物の積み出し施設への適用例はなかった。

表 35 冷却回収装置の特徴

冷却方式	特徴
単純冷却法 (Chilled liquid ABSORPTION)	VOC を冷却して液化回収する方法。 大気圧下で処理後の出口濃度を 50ppm 以下にするには、トリクロロエチレンで約-80℃まで冷却する必要がある。
圧縮深冷凝縮法 (CRYOGENIC CONDENSATION)	加圧下で VOC を冷却して回収する方法。 ガスの吸引方法を工夫することで、トリクロロエチレンで-30℃程度まで冷却すれば、出口濃度 50ppm 以下が達成できる。

資料：「クロロカーボン適正使用ハンドブック」（平成 12 年 9 月、クロロカーボン衛生協会）に基づいて作成した。



出典：「クロロカーボン適正使用ハンドブック」（平成 12 年 9 月、クロロカーボン衛生協会）

図 40 圧縮深冷凝縮法による冷却回収装置の例

(2) 直接燃焼法とその適用

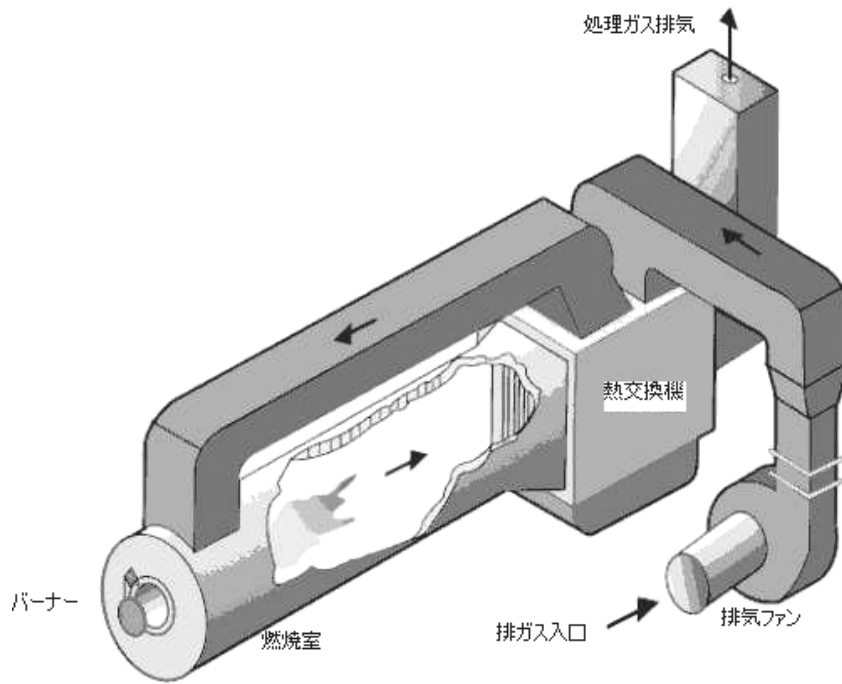
直接燃焼法とは、バーナーにより、VOC を 650℃～800℃の高温下で瞬時に酸化分解する方法である。直接燃焼法を用いた VOC 処理装置(以下「直接燃焼装置」)の特徴を表 36 に、直接燃焼装置の例を図 41 に示す。

酸化分解可能な物質であれば、ほとんどの臭気及び有機溶剤ガスに対応できる。VOC 濃度が高いとき(1000ppm 以上)に有効で、広範囲の有機溶剤(炭化水素系)に適用できる。排ガス中 VOC 濃度が低く、空燃比が燃焼可能範囲より低い場合は、前処理として濃縮を行うか、助燃剤を用いることにより、対応可能である。

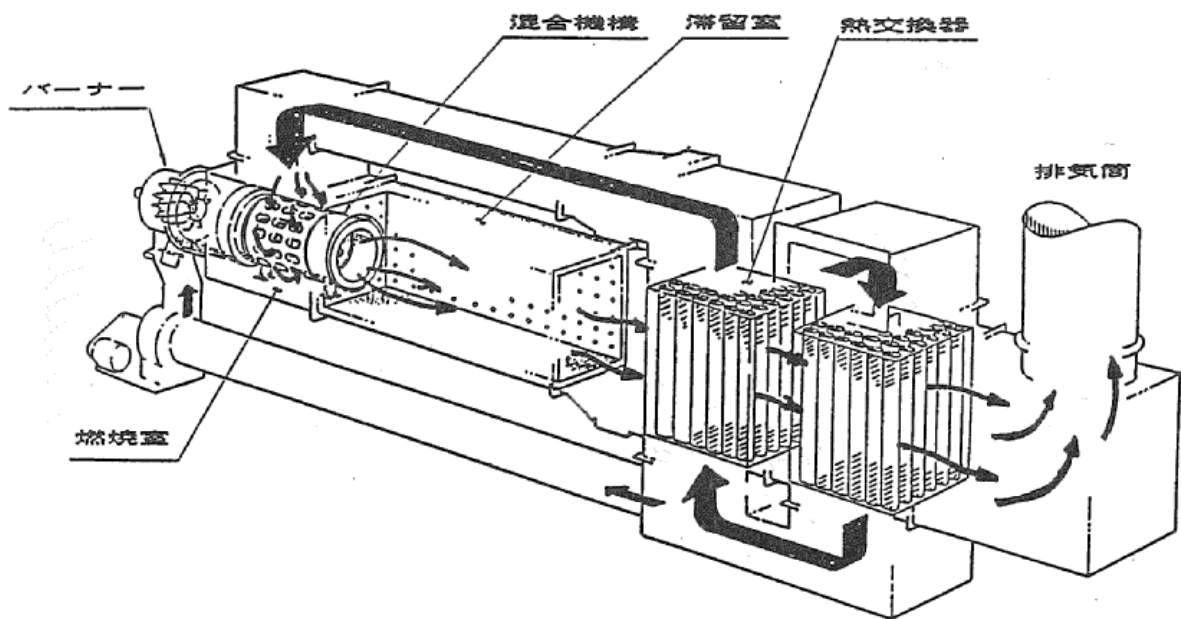
最も建設コストが安くランニングコストも比較的安価であるケースが多いため、米国において船舶向け出荷施設に対する適用例が多く、可搬型装置も製品化されている。

表 36 直接燃焼装置の特徴

長所	短所
<ul style="list-style-type: none">● 極めて高い処理効率が得られる● 処理効率の経時変化がない● VOC の発生源の負荷変動に伴う処理効率の低下が見られない● 操作及び保守管理が容易● ほとんどの VOC に対して適用可能	<ul style="list-style-type: none">● 適切な廃熱回収のできない場合は、助燃剤によるランニングコストが高い● 重油燃料使用時に SO_x が発生する● NO_x が発生する● VOC 濃度が低くなるほど、経済性は悪くなる



資料：「炭化水素類排出低減技術マニュアル」（平成4年1月、東京都）に基づいて作成した。



メーカー技術資料より作成

図 41 直接燃焼装置の例

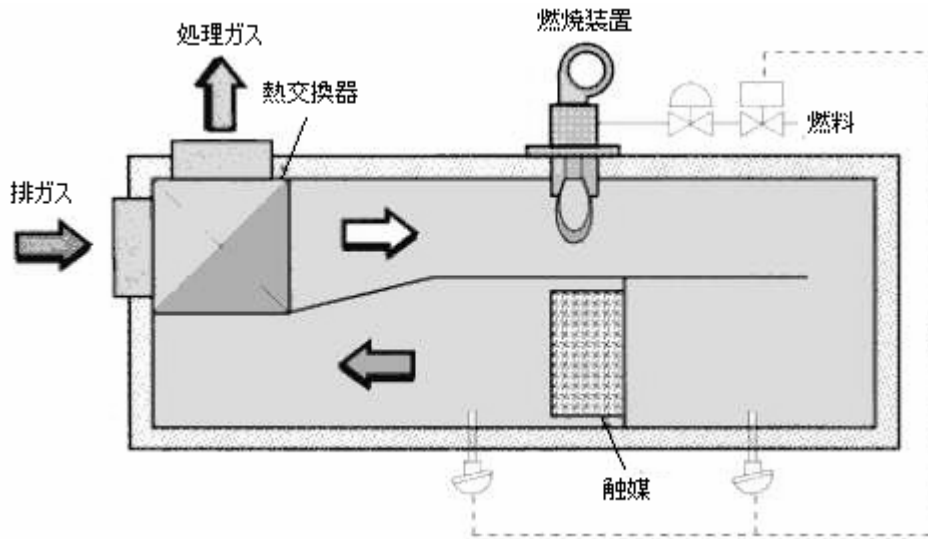
(3) 触媒燃焼法とその適用

触媒燃焼法とは、白金やパラジウムなどの触媒を用いて VOC を 200℃～350℃の低温下で酸化分解する方法である。触媒燃焼法を用いた VOC 処理装置(以下、「触媒燃焼装置」)の特徴を表 37 に、触媒燃焼装置の例を図 42 に示す。廃熱回収を行わないのであればガソリン荷役起源の VOC に対しても適用可能である。

表 37 触媒燃焼装置の特徴

長所	短所
<ul style="list-style-type: none"> ● 触媒により低温での燃焼が可能 ● 直接燃焼法に較べて燃料費が少ない ● 装置は比較的低温仕様で軽量である ● 防爆危険性が少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ● タール、ミスト、ダストの影響が大 ● 物理、化学的触媒毒の影響が大 ● 熱回収の投資効率が低い ● 触媒の劣化がわかりにくい

資料：「炭化水素類排出低減技術マニュアル」（平成 4 年 1 月、東京都）に基づいて作成した。



メーカー技術資料より作成

図 42 触媒燃焼装置の例

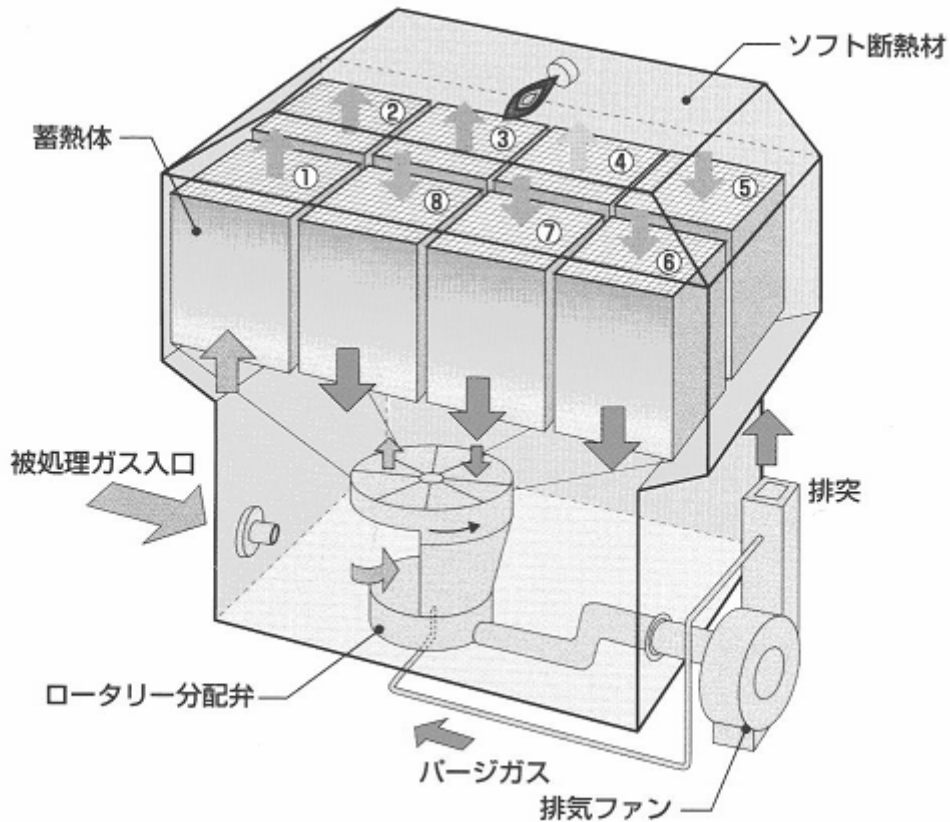
(4) 蓄熱燃焼法とその適用

蓄熱燃焼法とは、砂やセラミックなどの耐熱性、蓄熱性のある固定層(蓄熱層)を持ち、これを媒体として高温(800℃～1000℃)で、VOC と接触させて酸化分解する方法である。蓄熱燃焼法を用いた VOC 処理装置(以下、「蓄熱燃焼装置」)の特徴を表 38 に、蓄熱燃焼装置の例を図 43 に示す。ガソリン出荷施設のように、ベーパーガスの発生および処理作業が間歇的になる場合は適用が難しい。

表 38 蓄熱燃焼装置の特徴

長所	短所
<ul style="list-style-type: none"> ● 低濃度で自燃する(熱交換効率が最高で98%までとれるので、トルエン換算で200ppm あれば自燃する) ● 処理ガスの濃度変化にも対応 ● NO_x、SO_x の発生が少ない ● 保守、点検が容易 ● 据付工事が容易で短期間 ● 固定層の寿命は半永久的 	<ul style="list-style-type: none"> ● 塗装排ガスを直接使用する場合にはフィルターが必要 ● 電力使用量が比較的大 ● 装置重量が比較的大

資料：「炭化水素類排出低減技術マニュアル」(平成4年1月、東京都)に基づいて作成した。



メーカー技術資料より作成

図 43 蓄熱燃焼装置の例

(5) 溶剤回収法とその適用

溶剤回収法とは、炭化水素蒸気を専用の溶媒に溶かし込み、その後に回収又は処理をするものであり、比較的古くから用いられてきた技術である。

装置は炭化水素蒸気の吸収セクション、吸収油の再生セクション、炭化水素の回収セクションに分けられる。図ではガソリン荷役起源の VOC に対して、同じガソリンを溶剤に用いる例を示しているが、溶剤としては他に灯油などが用いられる例もある。炭化水素を含んだガスは吸収塔のボトムから導入され、ポールリングが充填された塔内で吸収油(ガソリン)と気液が向流接触する。回収された有機炭素を含んだ溶剤はそのまま出荷されたり、図に示すように容易に分離できる場合は、分離後製品として再利用される。

溶剤回収法を用いた VOC 処理装置(以下「溶剤回収装置」)の特徴を表 39 に、溶媒回収装置の例を図 44 に示す。

表 39 溶剤回収装置の特徴

長所	短所
<ul style="list-style-type: none"> ● 単一溶媒で複数荷種に対応できる ● 処理ガスの濃度変化にも対応できる ● 据付工事が容易で短期間 ● 電力使用量が比較的大 ● 固定層の寿命は半永久的 	<ul style="list-style-type: none"> ● 回収する場合は、別プロセスが必要 ● 装置重量が比較的大 ● 保守、点検が煩雑

資料：「炭化水素類排出低減技術マニュアル」(平成 4 年 1 月、東京都)に基づいて作成した。

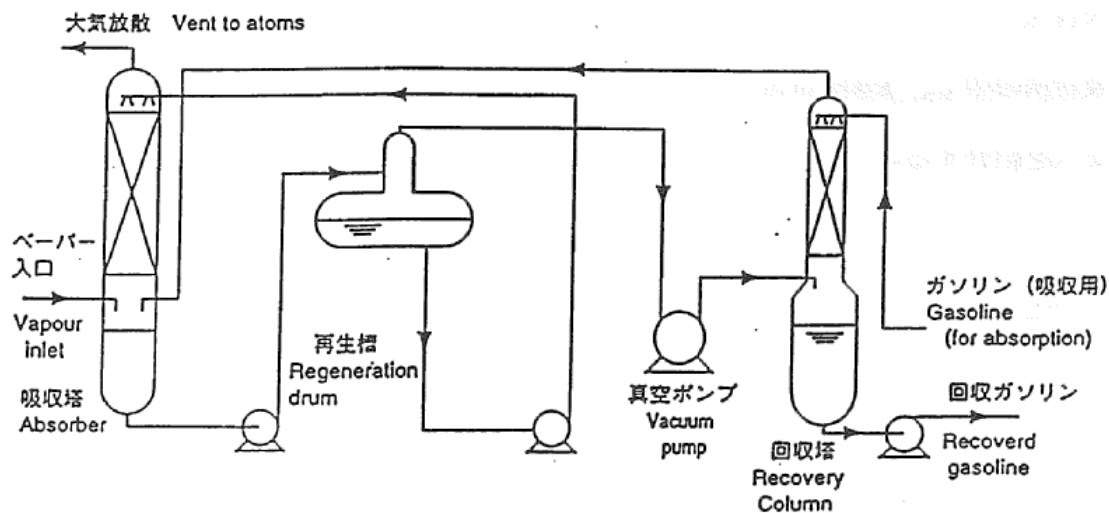


図 44 溶媒回収装置の原理

出典;平成 7 年度揮発性有機化合物光化学大気汚染抑制技術と削減対策のガイドラインに関する調査報告書

(6) 膜分離法の特徴

膜分離法とは、吸着法や深冷凝集法の設備の巨大化、運転、保守などの煩雑性を改善させるために開発されたもので、ガス分離膜ユニットと回収塔に大別される。膜ユニット内部では膜の透過側を真空ポンプにより負圧に保ち、膜を通過する空気と炭化水素類の透過速度差を利用して、ガス中の炭化水素類を選択的に分離濃縮する方法である(膜ユニット内で数 100 回の膜透過が行われる)。回収塔では、60-70vol%に濃縮されたガソリン荷役起源の VOC がボールリングなどを充填した回収塔に入り、液体ガソリンとの向流接触により大半が液体ガソリンに吸収される。未回収は再び膜分離ユニットの上流側に戻される。膜分離法を用いた VOC 処理装置の特徴を表 40 に、膜分離法装置の例を図 45 に示す。

横浜根岸の新日本石油根岸精油所において、タンクローリ車への出荷施設において、ガソリン荷役起源の VOC への適用例がある。

表 40 膜分離回収装置の特徴

長所	短所
<ul style="list-style-type: none"> ● 燃焼雰囲気が存在しない。 ● 処理ガスの大幅な濃度変化にも対応 ● 保守、点検が容易 ● 据付工事が容易で短期間 ● 膜分離ユニットの寿命は半永久的 	<ul style="list-style-type: none"> ● 不純物や水分に弱い(膜分離性能が低下する) ● 電力使用量が比較的大 ● 装置重量体積が比較的大

資料：「炭化水素類排出低減技術マニュアル」(平成 4 年 1 月、東京都)に基づいて作成した。

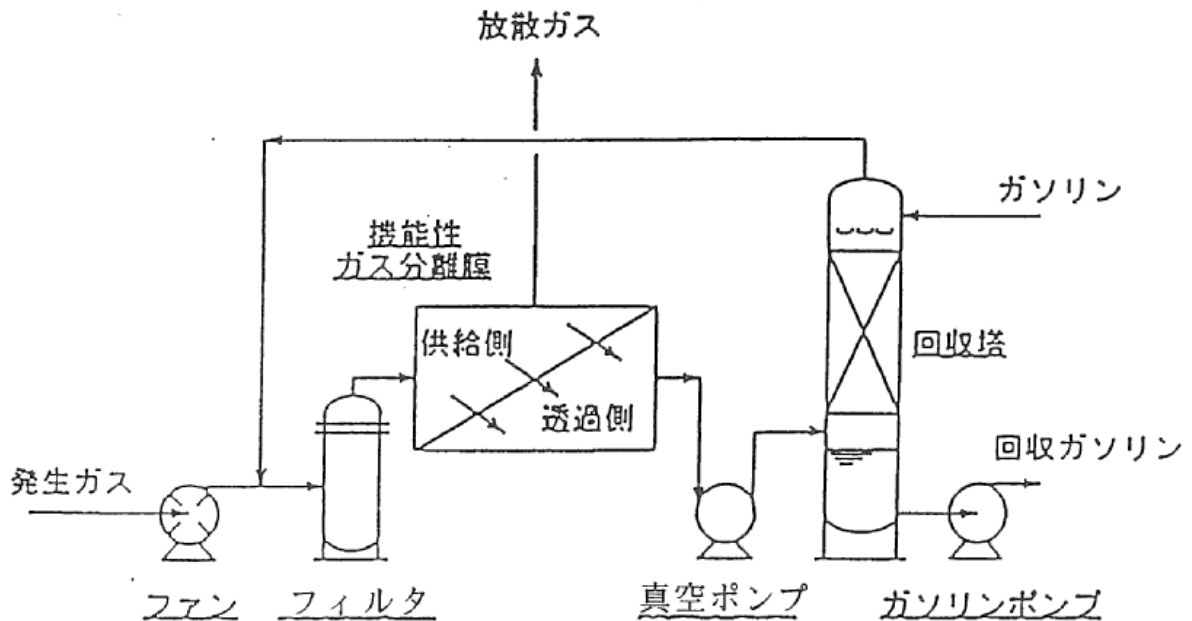


図 45 膜分離法の原理

出典;平成 7 年度揮発性有機化合物光化学大気汚染抑制技術と削減対策のガイドラインに関する調査報告書

(7) 吸着法の特徴

吸着法とは、吸着剤に VOC を含む排ガスを通すことにより、VOC を回収(又は濃縮)する方法である。吸着剤としては、活性炭、シリカゲル、アルミナ、ゼオライト等があるが、VOC の処理には活性炭が多く使用されている。

吸着法による VOC 処理装置(以下、「吸着装置」)には、吸着剤を定期的に交換する交換型と、吸着剤を交換せず吸着脱着を繰り返す回収型がある。ここでは、活性炭を使用した吸着装置の特徴を表 41 に、吸着法の例を図 46 及び図 47 示す。

また、回収したガスの脱着法により以下の二種類に分類される。

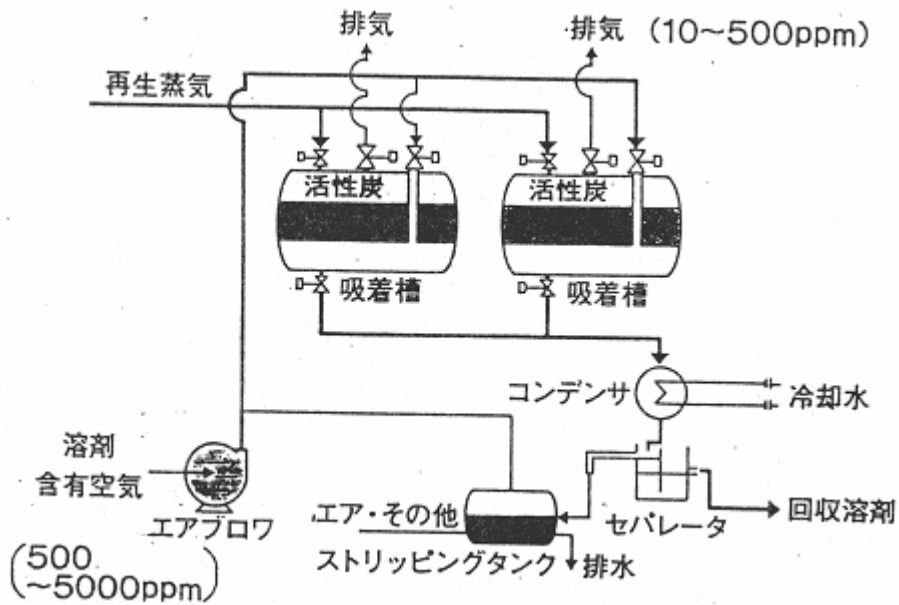
- ・ Thermal Swing Adsorption 吸着剤の温度による吸着量差を利用
- ・ Pressure Swing Adsorption 吸着剤の圧力による吸着量差を利用

吸着装置は、比較的 low molecular weight の VOC および悪臭物質のように結合(酸化)力が高い物質を対象に用いられることが多く、原油や BTX 類などの悪臭対策に適用可能である。陸上排出源を対象に吸着剤の改良が進められており、将来的にはガソリン荷役起源の VOC の処理に適用の可能性が考えられる。

表 41 活性炭を使用した吸着装置の種類別の特徴

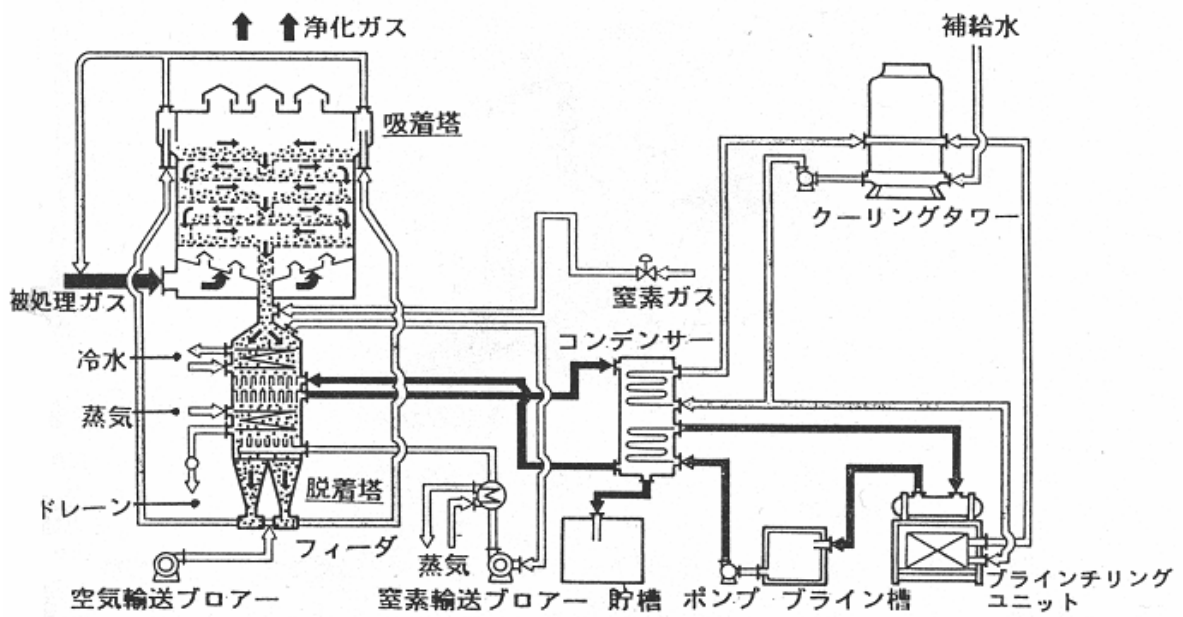
吸着装置の種類		特徴	
		長所	短所
交換型		<ul style="list-style-type: none"> ・システムの構成、装置の構造が簡単 ・設備費が安い ・運転管理が容易 ・排水処理が不要 等 	<ul style="list-style-type: none"> ・定期的に再生又は交換が必要 ・排ガス濃度が高い場合、粉じん中のタール状物質、ミストが含有されている場合には前処理が必要 ・ガス温度が高い場合には冷却しなければならない 等
回収型	固定床吸着式	<ul style="list-style-type: none"> ・操作が容易 ・風量や濃度変動に対応しやすい ・回収し省資源化が図れる 等 	<ul style="list-style-type: none"> ・凝縮排水の処理設備が必要(ただし、排水を生じない圧力スイング法 PSA もある)。 ・MEK 等のケトン系溶剤を処理するときは発火防止等の十分な安全対策が必要 等
	流動床吸着式	<ul style="list-style-type: none"> ・再生ガスとして窒素を利用する場合には、排水の処理設備が不要 ・水溶性溶剤も回収できる ・ケトン類も安全に回収できる ・回収し省資源化が図れる 等 	<ul style="list-style-type: none"> ・塗装排ガスを直接処理する場合には高度の除じん設備が必要 ・据付面積は小さいが、高さが高くなる 等
	ハニカム型吸着式	<ul style="list-style-type: none"> ・低濃度、大風量でも処理し得る(高濃度、小風量化できる) ・保守、保全が非常に簡単 ・故障がほとんどない ・据付面積が小さい 等 	<ul style="list-style-type: none"> ・高濃度になるほど、経済性が低くなる 等

資料：「炭化水素類排出低減技術マニュアル」(平成 4 年 1 月、東京都)に基づいて作成した。



出典：「炭化水素類排出低減マニュアル」(平成4年1月、東京都)

図 46 固定床吸着式の例



出典：「炭化水素類排出低減マニュアル」(平成4年1月、東京都)

図 47 流動床吸着式の例

2.6.3 船舶 VOC に関する排出対策技術

2.6.2 において、陸上における VOC 排出対策の動向に関する情報を収集整理した。VOC の排出対策には、2.6.2 で紹介した VOC 処理過程の他に VOC 回収が含まれる。燃料中の蒸散の回収には、燃料が当初積載されていた空タンクあるいは処理装置に、VOC を導くパイピングが用いられるのが一般的である。これをベイパーリターンパイプとよぶ。ベイパーリターン装置又はパイプは、2.1 で紹介したいように付属書VI上においては、VOC 回収装置として船側に設置されるもの、陸側のパイピングと実際の処理装置を VOC 制御装置として定義しており、現時点では船舶側における処理を想定していない。また、海防法においても船舶側に設置を要求するのは移送管であり、基本的には陸上側での処理を想定している。

船舶においては、回収された VOC を含むガスはボイラーと同じ構造をもつ装置で燃焼されることが多い。ベイパーリターンパイプより導かれた VOC は少量の油からなる助燃剤と空気とともに燃焼され、無害な二酸化炭素及び水となって大気に放出される。ただし、INTERTANKO およびノルウェーへの聞き取りによれば、欧州においては PSA(Pressure Swing Adsorption)方式を用いたガソリン回収装置に接続可能なガソリン出荷ふ頭が 150 ヶ所以上あり(ただし主に内航船や北海関連の製油所からの短距離輸送)、経済的にも出荷量ベースで年間に 0.5 %程度の回収ができるため、EU 域内の金利及び焼却年数の条件下において、15 年で初期コストを回収できるとしているレポートもある。

また、我が国で一部の製油所や石油コンビナートに、地方自治体からの要請により、タンクローリー車への出荷施設において膜分離法が、ベンゼンの積み荷ふ頭において溶剤回収法が、環境対策として自主的に採用された例があるが、現時点ではコスト高と考えられる(図 48 参照)。

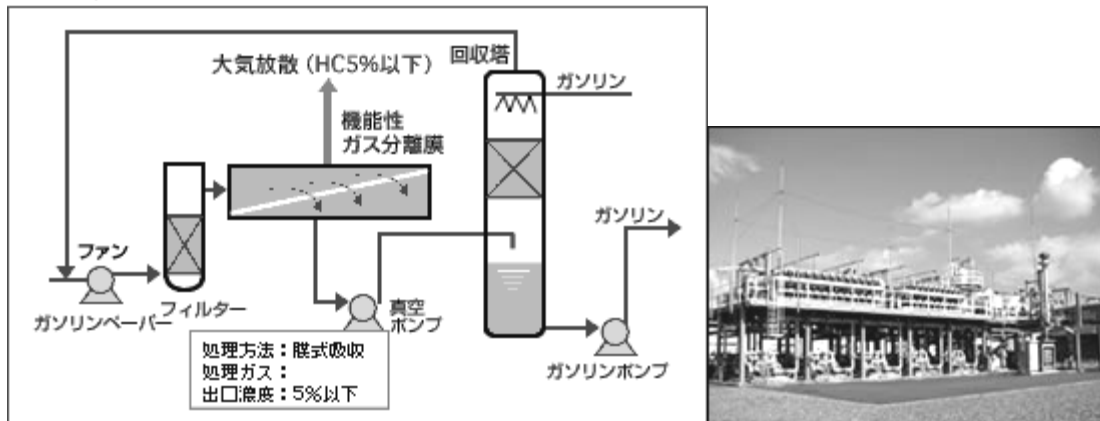
ガスフリー作業など海上での排出に適用できる対策技術は、現時点では存在しないと考えられる。(独)海上技術安全研究所では、船員への暴露防止を目的に船舶に搭載可能な VOC 処理装置を開発中であり、今後の動向が注目される。

船舶排ガス中に含まれる VOC の削減は、NO_x、SO_x 対策に比較して重視されていない。また、船舶に搭載された機関は、自動車用機関などに比較して低速であり、かつ負荷変動が穏やかなことから、VOC 濃度は低いことも予想される。このため、VOC 排出濃度削減を主目的とした対策技術は現時点ではないと言える。

ただし、低 NO_x 化のためのスワール発生や燃料噴霧の均一化などの燃焼技術によって、初期燃焼雰囲気平均化されるため NO_x 濃度の低下とともに、VOC 濃度の低下もある程度は期待できると考えられる。また、将来の NO_x 排出基準の強化を想定して考えられている排ガス後処理においては VOC も同時に処理できる可能性もあり、今後低 NO_x 技術が排出ガス中の VOC 濃度に及ぼす影響については、注意をしていく必要があると考えられる。

根岸製油所では、光化学オキシダント原因物質の1つとされている炭化水素について、タンクローリーやタンク車の出荷設備に炭化水素回収設備を設置し、排出抑制をおこなっています。下のフロー図及び写真は、平成10年に完成した膜分離方式の最新装置で、排出ガス中の炭化水素濃度は県条例(8%以下)、横浜市指導値(5%以下)に比べ、さらに低い排出値(1%以下)となっています。

炭化水素膜式吸収設備



神奈川県生活環境の保全等に関する条例(平成13年4月1日施行)第二十五条(1)ウにおいて、タンク車又はタンクローリーに原油、揮発油、ナフサ給油する油槽所(貯蔵施設の容量が合計で1,000キロリットル以上であるものに限る。又は製油所に設置される出荷施設に限る。)において、炭化水素系物質の排出口における濃度が8容量パーセント以下である排出防止装置又は炭化水素系物質の除去率が温度20度において80パーセント以上である排出防止装置を設置すること。

横浜市横浜市生活環境の保全等に関する条例(平成14年12月25日条例第58号)第6章 特定行為の制限等 第2節 炭化水素系物質を使用する作業の制限等(炭化水素系物質の発散の防止の設備)

第48条 「炭化水素系物質を車両(交通安全対策基本法(昭和45年法律第110号)第2条第2号に規定する車両をいう。以下同じ。)で規則で定めるものにより運搬する事業者は、当該車両に係る積卸しの作業の際における当該物質の発散の防止に必要な設備で規則で定めるものを当該車両に設けなければならない。」 出荷施設の排出濃度に関する指導値は当初8%、その後5%に変更された。

図 48 陸上のタンクローリー用出荷施設に設置された VOC 回収装置の例 (新日本石油根岸製油所 HP より)

2.6.4 対策コストの試算

EUが2002年に作成した「Measures to Reduce Emissions of VOCs during Loading and Unloading of Ships in the EU」には、処理装置のコストが示されている。図 51 に処理原理ごとのイニシャルコストを示した。ただし、ここでは VOC 回収(ガソリン荷役による発生 VOC の回収)を行った際に、その回収による収率上昇は見込まれていない。風量が増すほど処理装置が大型化し設置コストが増大する傾向にある。また、燃焼処理技術が最もコストがかからないことは、明らかである。ただし、回収法によりガソリン燃料起源の VOC 回収率が大きくなれば、塗装などのベーパーと異なり商品として利益を生むため、総コストは低く抑えられる。また、直接燃焼法などで発生した廃熱の利用なども総コストの削減に寄与するため有効であるが、他方システムの複雑化に繋がり信頼性や作業手順の煩雑化に繋がりやすい。

今回タンカーへの適用では、数 1000 m³/h の処理風量が想定されるため、吸着法、冷却回収法、膜分離法の回収方式は、いずれも現実的ではないと考えられる。燃焼法は、触媒燃焼法と直接燃焼法の二つに大別されるが、タンカーからの回収ガスは VOC 濃度が高く、かつ風量も多いことから直接燃焼法が適していると思われる。

直接燃焼法のイニシャルコストは、EU レポートでは以下のように風量に対する式 1 として試算されている。R は処理される VOC ガスの風量(m³/h)である。下記のコストには自動消火装置や防止弁などの安全装置、ベーパーブロワー、配管などを含んでいるが、船舶側の改造コストなどは含まれない。また、国内メーカーへの聞き取りによれば、式 1 のコストから更に 1.5~2 倍程度と推定される。国内外の差額は、石油コンビナート等災害防止法¹³などに基づく防爆壁など設備の変更以外に、認定料や保安コストが含まれることによるとされる。

ここで、各船舶に処理施設を搭載した場合と陸上側に施設を設ける場合について比較をすると、直接燃焼法においては式 1 で示したように処理ガス量に対して直線関係にあるコストは船舶側陸側のどちらに設置しても式上は同じコストがかかる、しかし、排ガス量が少なくても必ずかかる 200,000 US\$が、各タンカーへの設置の場合に余分にかかることになる。また、施設の年間利用率も、複数のタンカーが利用する荷積み施設への設置のほうが有利である。

VOC は従来、処理するべきものという位置づけであったが、これを資源として使用するという技術開発も進んでいる。先の溶液回収もそのひとつであるが、ここでは VOC を高濃度に含まれたガスをそのままガスタービンの給気に導き、燃費を改善するという技術を紹介する。新潟原動機株式会社が開発中のものであり(石川島播磨技報 Vol.43 No.6 (2003-11))、通常のガスタービンに図 49 に示すような VOC 導入装置を付加して、燃焼機内で助燃剤である灯油と同時に燃焼させ、その総合効率を上昇させるというものである。図 50 に示すようにガスタービン入り口の VOC 濃度が、トルエン換算で 1500 ppm の場合、導入前に灯油だけで燃焼させた場合に比較して、燃料消費率は 40%近く節約できることになる。なお、この場合導入されたトルエンの 99%がタービン内で分解(燃焼処理)されている。ガソリン荷役起源の VOC では、初期には本システムのような濃縮機の使用が必要になるが、荷役後半の 1%C を超える領

¹³同法に基づき、石油コンビナート等特別防災区域に指定された区域内における施設には、石油コンビナート等防災計画に基づき、防爆や高压容器などについて一層の安全化が要求されるため、コスト増に繋がる。

域においてはそのまま導入あるいは外気による希釈が必要になると思われる。

このように廃熱だけでなく電気が得られる場合は、コスト的に大きなメリットがある。一般的に灯油焚きのガスタービンによる発電は、電力会社からの買電に比較してコスト的なメリットが少ないと言われており、このためコジェネレーションなどの付随的な省エネ技術が模索されているところである。今回のシステムでは、従来捨てられていた VOC 分を発電のための燃料として使用しており、濃縮機や補助ファンなどの補機類のインシヤルコストおよびランニングコストを考えると、従来より安い電力が得られる可能性があり、燃料の蒸発過程で生じる VOC の処理への適用が期待されるところである。

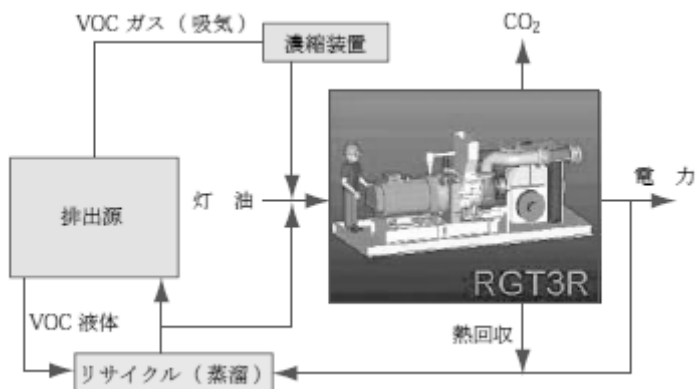


図 49 新潟原動機が開発中の VOC 処理システムフロー

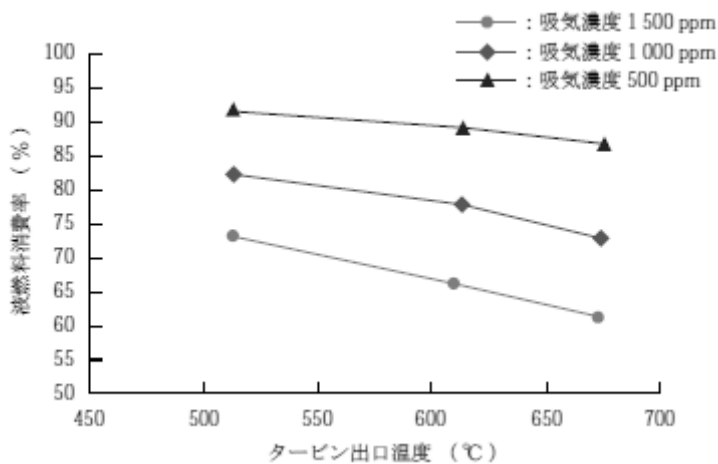
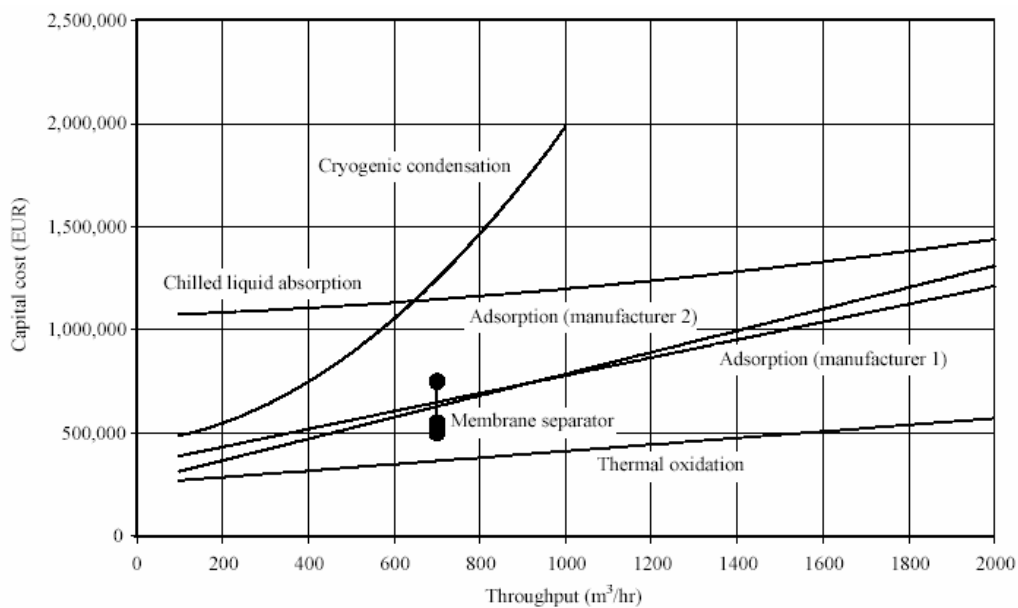


図 50 新潟原動機が開発中の VOC 処理システムの燃料消費率の向上

$$\text{COST(US\$)}=125 \times R+200,000$$

(式 1)

ただし、R は処理風量(m³/h)



ADSORPTION

吸着方式

Thermal oxidation

直接燃焼方式

Chilled liquid ABSORPTION

冷却液化方式

CRYOGENIC CONDENSATION

低温液化方式

(EU レポートより)

図 51 VOC 処理装置設置コストの処理原理ごとの比較

2.7 光化学シミュレーションによるベイパーガスの環境影響評価

2.7.1 我が国における光化学汚染状況の概観

(1) オゾンの汚染状況

オゾン(光化学オキシダント)の環境基準に関する指標の経年変化について、「大気汚染状況報告書」(環境省環境管理局から毎年度発行される。国設局および地方自治体が設置した全国の大気環境測定局の大気汚染物質データの集計結果が掲載される)に掲載のデータを集計した結果を表 42 に示した。

オゾンに関するほとんどすべての指標は、ほぼ全国的に増加もしくは悪化の傾向にあり、特に 0.12ppm を超える時間数、日数に比較して、0.06 ppm を超える時間数と日数の増加が著しく、中程度の高濃度現象が定常化しつつある状況を示している。地域別に見ると、京都府、奈良県、滋賀県などの関西地域で改善が見られるのに対し、多くの地域で悪化の傾向にある。特に、長野県、徳島県、高知県、佐賀県、宮崎県など、従来汚染程度の低かった地方で、悪化が比較的進んでいる傾向が読み取れ、全国的にオキシダント汚染が広がっていることがわかる。

また、年平均値は平成元年度から平成 13 年度までに、全国で 14.4 %の増減率を示している。「昼間の 1 時間値の最高値」及び「昼間の 1 時間値が 0.12 ppm 以上の日数・時間数」の増減率より、「昼間の日最高 1 時間値の年平均値」及び「昼間の 1 時間値が 0.06 ppm 以上の日数・時間数」の増減率が高いことは、0.06~0.12 ppm 程度までの中高濃度の出現頻度が増加しているためと考えられ、これが年平均値を高めている。

(2) NMHC の汚染状況

非メタン炭化水素の環境基準に関わる関連指標の経年変化について、表 43 に示した。非メタン炭化水素については、光化学オキシダントの日最高 1 時間値に対応する指針値として午前 6 時から 9 時の 3 時間平均値が 0.20~0.31 ppmC と示されていることから、それぞれの値を超える日数についてもその増減を示している。

全国で見ると、特に、0.31 ppmC を超える日数は、平成 13 年度までに 56.4 %も減少しており、6 つの NMHC に関する指標の中ではもっとも改善傾向が大きい。

6~9 時までの 3 時間平均値についても、全体としては改善の方向にあるが、その最低値については都道府県ごとのばらつきが大きく、青森、茨城、栃木、奈良、香川、鹿児島、沖縄の 8 県においてはむしろ増加の傾向にある。

多くの指標について、特に近畿地方で改善傾向が見られており、同地方における光化学オキシダントが、他の地域と比較してそれほど悪化していない状況にあることと良く合致している。一方で、関東地方においては、非メタン炭化水素濃度に関するほとんどの指標が関西地方とほぼ同程度の低下傾向にあるにもかかわらず、光化学オキシダントに関してはほとんどの指標で増加傾向にある(図 52)。その他の地方についても、光化学オキシダントと非メタン炭化水素の指標の増減傾向は一致しない場合が多い。光化学オキシダント指標の悪化傾向には、少なくとも非メタン炭化水素濃度の現在の指標だけでは十分に評価しきれない可能性がある。

表 42 光化学オキシダントに関する各指標の都道府県別増減

		昼間の1時間 値の年平均値	昼間の1時間値 が0.06ppmを 超えた日数	昼間の1時間値 が0.06ppmを 超えた時間数	昼間の1時間値 が0.12ppm 以上の日数	昼間の1時間値 が0.12ppm 以上の時間数	昼間の1時間値 の最高値	昼間の日最高 1時間値の 年平均値
1	北海道	-	+	+	0	0	+	-
2	青森県	-	-	-	0	0	+	-
3	岩手県	++	++	+++	0	0	++	++
4	宮城県	+	+	+	++	+++	+	+
5	秋田県	+	+	++	++	++	+	+
6	山形県	++	+++	+++	-	△	++	++
7	福島県	+	+	+	++	+++	+	+
8	茨城県	+	+	+	+	+	+	+
9	栃木県	+	+	+	+	+	+	+
10	群馬県	++	+	+	+	+	+	++
11	埼玉県	+	+	+	+	+	-	+
12	千葉県	+	+	+	-	-	-	+
13	東京都	++	+	+	+	+	+	++
14	神奈川県	+	+	+	-	-	+	+
15	新潟県	+	+	+	0	0	+	+
16	富山県	+	+	+	---	---	+	+
17	石川県	+	+	+	---	---	+	+
18	福井県	+	+	+	---	---	-	+
19	山梨県	+	-	-	---	---	-	-
20	長野県	++	++	++	+++	+++	+	++
21	岐阜県	++	+	+	+	++	+	++
22	静岡県	+	+	+	+	+	+	+
23	愛知県	+	+	+	-	+	-	+
24	三重県	+	+	+	+	+	+	+
25	滋賀県	-	-	-	---	---	-	-
26	京都府	-	-	-	---	---	-	-
27	大阪府	+	+	+	-	-	+	+
28	兵庫県	+	+	+	+	+	+	+
29	奈良県	-	-	-	---	---	-	-
30	和歌山県	++	+	+	+	++	+	+
31	鳥取県	+	+	+	0	0	+	+
32	島根県	+	+	+	++	++	+	+
33	岡山県	-	-	-	-	-	+	-
34	広島県	+	+	+	-	-	+	+
35	山口県	+	+	++	+++	+++	+	+
36	徳島県	++	++	++	++	++	++	++
37	香川県	+	+	+	-	-	+	+
38	愛媛県	+	+	+	---	-	+	+
39	高知県	+++	++	++	+	+	++	+++
40	福岡県	+	+	+	-	-	-	+
41	佐賀県	++	++	+	+++	+++	+	++
42	長崎県	+	+	++	0	0	+	+
43	熊本県	-	-	-	---	---	-	-
44	大分県	-	-	-	-	-	-	-
45	宮崎県	+++	+++	+++	0	0	++	+++
46	鹿児島県	+	+	+	+	+	+	+
47	沖縄県	++	+++	+++	-	-	++	++
	全国	+	+	+	+	+	+	+
	(13年間)	14.4%	40.8%	56.4%	14.4%	9.7%	1.6%	13.2%

(注)+++：年当たり4%(日数、時間数の欄は20%)以上の増加、++：年当たり2%(同様に10%)以上の増加、+：年当たりの増加が0~2%(同様に0~10%)、---：年当たり4%(同様に20%)以上の減少、--：年当たり2%(同様に10%)以上の減少、-：年当たりの減少が0~2%(同様に0~10%)、△：増減なし、0：データはすべてゼロ。

なお、増減率の計算に当たっては、各都道府県毎の全測定局の数値を用い、直線回帰によって1年当たりの増加量(直線の傾き)を算出した。濃度については、単年度増加量を平成元年度の回帰直線上の濃度で割ることにより単年度増減率とした。日数と時間数については、平成元年度の回帰直線上の値が1未満になる場合は、全て1時間1日に対する割合を、また、365日もしくは8760時間を越える場合は、有効測定日数、有効測定時間数に対する割合として算定した。

参考として、上記単年度増減率に12を乗じて13年分の増加分とし、同様に平成元年の値(回帰直線上の値)に対して割合を求め、「13年間の増減率」とした。

表 43 非メタン炭化水素に関する各種指標の都道府県別増減

		年平均値	6～9時における 年平均値	6～9時3時間平 均値の最高値	6～9時3時間平 均値の最低値	0.20ppmCを超 えた日数の割合	0.31ppmCを超 えた日数の割合
1	北海道	-	-	-	--	-	-
2	青森県	+	+	-	+	+	+
3	岩手県	/	/	/	/	/	/
4	宮城県	--	--	--	-	-	-
5	秋田県	---	---	-	---	---	-
6	山形県	/	/	/	/	/	/
7	福島県	--	--	--	-	-	-
8	茨城県	-	-	-	++	+	-
9	栃木県	--	--	-	++	-	-
10	群馬県	/	/	/	/	/	/
11	埼玉県	--	-	--	+	-	-
12	千葉県	--	--	--	-	-	-
13	東京都	--	--	--	---	-	-
14	神奈川県	---	--	---	--	-	-
15	新潟県	-	-	---	---	-	-
16	富山県	/	/	/	/	/	/
17	石川県	---	---	---	--	--	---
18	福井県	---	---	--	---	--	---
19	山梨県	/	/	/	/	/	/
20	長野県	-	-	-	---	-	-
21	岐阜県	---	---	-	---	-	--
22	静岡県	--	--	--	--	-	-
23	愛知県	---	--	--	---	-	-
24	三重県	--	-	-	--	-	-
25	滋賀県	--	--	--	---	-	-
26	京都府	--	--	--	---	-	-
27	大阪府	--	--	-	---	-	-
28	兵庫県	--	--	-	--	-	-
29	奈良県	---	---	---	+++	-	-
30	和歌山県	---	--	-	---	-	---
31	鳥取県	---	---	---	---	--	---
32	島根県	--	--	-	---	--	-
33	岡山県	-	-	++	-	-	-
34	広島県	--	--	-	---	-	-
35	山口県	--	--	--	---	-	-
36	徳島県	/	/	/	/	/	/
37	香川県	--	--	--	+++	-	-
38	愛媛県	--	--	--	---	-	-
39	高知県	/	/	/	/	/	/
40	福岡県	-	-	-	-	-	-
41	佐賀県	/	/	/	/	/	/
42	長崎県	--	--	+++	-	-	-
43	熊本県	---	---	---	---	-	-
44	大分県	--	--	-	---	-	-
45	宮崎県	---	---	---	---	---	---
46	鹿児島県	-	+	---	++	+	+
47	沖縄県	+++	+++	+	++	++	+++
	全国	--	--	--	--	-	-
	(13年間)	-39.6%	-33.6%	-27.6%	-33.6%	-32.4%	-56.4%

(注)+++：年当たり4%(日数、時間数の欄は20%)以上の増加、++：年当たり2%(同様に10%)以上の増加、+：年当たりの増加が0～2%(同様に0～10%)、---：年当たり4%(同様に20%)以上の減少、--：年当たり2%(同様に10%)以上の減少、-：年当たりの減少が0～2%(同様に0～10%)、：増減なし、0：データはすべてゼロ。

なお、増減率の計算に当たっては、各都道府県毎の全測定局の数値を用い、直線回帰によって1年当たりの増加量(直線の傾き)を算出した。濃度については、単年度増加量を平成元年度の回帰直線上の濃度で割ることにより単年度増減率とした。日数と時間数については、平成元年度の回帰直線上の値が1未満になる場合は、全て1時間1日に対する割合を、また、365日もしくは8760時間を越える場合は、有効測定日数、有効測定時間数に対する割合として算定した。

参考として、上記単年度増減率に12を乗じて13年分の増加分とし、同様に平成元年の値(回帰直線上の値)に対して割合を求め、「13年間の増減率」とした。

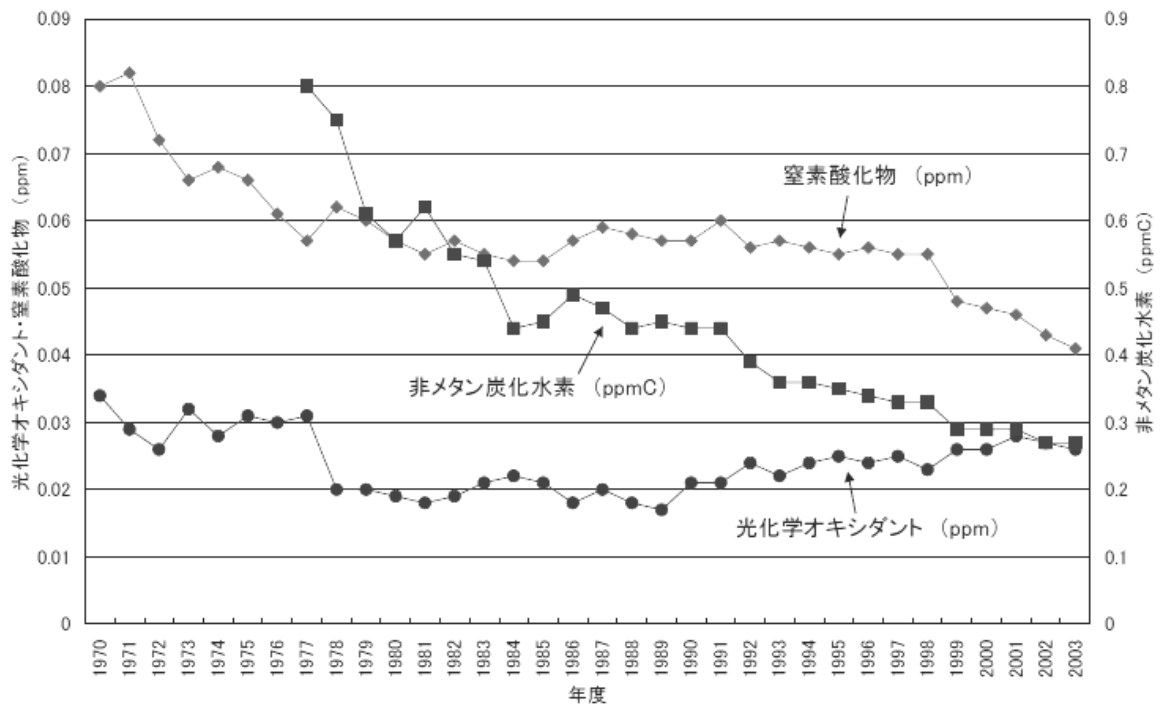


図 52 東京都における非メタン炭化水素濃度、光化学オキシダント濃度、窒素酸化物濃度の年平均値の経年変化

(3) オゾン濃度の地域別・月別の汚染状況

オゾン濃度は、光化学スモッグ注意報や警報の発令状況でも明らかなように、一般に夏季において高濃度を示すことが多いが、ここ 10 年ほどでその傾向は変わりつつある。そこで、我が国のオゾン濃度の現況を、環境省が全国に設置している大気汚染測定局(以下、国設局)のデータから概観する。

(a) オゾン濃度の頻度分布の相違

図 53 に、全国の国設局における平成 12 年度のオキシダント 1 時間値の頻度分布を、4,5 月期と 7,8 月期で集計し比較した。明らかに分布の構造が異なっており、4,5 月期は 50 ppb 程度の出現頻度が高いが、7,8 月期はより濃度が低いほど出現頻度が高くなっている。また、平均値も 4,5 月期の 46 ppb に対して 7,8 月期の 18 ppb と前者の方が高くなっている。一方、80 ppb 程度より上の高濃度の出現頻度は、7,8 月期の方が高くなっている。つまり、4-5 月期は全体にオゾン濃度が 50 ppb 前後に固まっているが、80ppb 以上の中高濃度の発生頻度は少ないのに対して、7-8 月期は、最頻値は非常に小さいものの、一時的に 80ppb 以上の高濃度が出現するという状況であると言える。これまで夏季のみに汚染が起きると考えられていた状況が変化し、4,5 月期においても、オゾンの大気環境状況が悪くなっており、4-5 月期においては、環境基準値である 1 時間値 60 ppb の達成が多く時間で困難になっている状況が見て取れる。

4,5 月期のオキシダント濃度に及ぼす要因として以下のような仮説が考えられている。第一に、北半球の中高緯度(北緯 30~40 度)における対流圏上層(7 km)のオゾン濃度も 4,5 月に高くなることから、対流圏上層の季節変動が地上の月別平均オキシダント濃度に影響すること、第二に、安定した太平洋高気圧に覆われる 7,8 月期に比較して、移動性高気圧や前線の発達する 4,5 月には大陸性の移動性高気圧の移動により中国大陸起源のオキシダント供給が増えること、第三に、同じく移動性高気圧や前線の移動により沈降性の逆転層や下降気流による対流圏上層から接地境界層へのオキシダント供給が活発になること、などであり、特に第二の大陸側からの供給は、飛行機を使用した実測などで、一部確認されているところである。一方、いわゆる光化学スモッグ注意報や警報といった激甚な高濃度は、7,8 月期に現出しており、かつこれらの高濃度は局地的に発生していることから、関東地方、九州地方といった地域スケールでの VOC 排出が直接的に影響するのは 7,8 月期であると言える。

(b) オゾン濃度日変化の地域間の相違

次に、地域間の特徴をオゾン濃度の日変化の差異を中心に概観する。図 54 及び図 55 の左側には昼間の 1 時間値の平均濃度を、右側には日最高 1 時間値の月別平均濃度を示している。昼間の平均濃度を左図で見た場合、ほぼ全ての都道府県で 4,5 月に濃度のピークを示している。その一方で、右図でみると、埼玉県、群馬県などオゾン汚染が進んでいると考えられている地域では、7,8 月期にそのピークが存在し、近畿地方などでも左図とは異なった傾向を示している。これに対して、他の汚染が進んでいないと考えられる地域では左図の平均値同

様に 4,5 月にピークが存在する形になっている。つまり、全国的には 4,5 月期の方がオゾン濃度は高いが、夏季には一部の地域において更に高いオゾン濃度が現出するという状況が我が国における一般的なパターンであると言える。これを更に明らかにするために、図 54 及び図 55 の[昼間の日最高値](右図)と[昼間の日平均値](左図)の差を求め、月平均としたものを図 56 に示した。この指標はオキシダントの昼間における日較差を示したものである。

日較差は沖縄、鹿児島、秋田、岩手など一部の県を除いて最低でも 10ppb 前後であり、日較差が小さい時期は沖縄、鹿児島、岩手、秋田を除いて全て 1,2 月期および 11,12 月期の冬季である。一方、7,8 月期を中心とした夏季に日較差が高くなる傾向が、特に都市部において明らかである。一般に、清浄な地域であるほどオキシダントの日較差は小さく、バックグラウンド濃度の季節的変化にのみ影響される傾向がある。これは、清浄な地域においては、原因物質である NO_x および NMHC の供給量が少なく①毎日地表付近で生成されるオキシダントが少ないこと、②仮にオキシダント濃度が高くなっても、大気中の NO_x などとの反応による消費が少なく、オキシダントの寿命が都市大気に比較して長くなることなどによるものと考えられる。

環境省がオキシダントのバックグラウンド測定局として位置付けている国設笹岳測定局(宮城県標高 165 m、周辺は山間およびゴルフ場など)でのオキシダント濃度指標を図 57 に示した。同測定局では、オキシダントの絶対値は特に低濃度ではないが、日較差は夏季(6~8 月)において最大で 15 ppb、冬季(1-2 月、12 月)では 5 ppb 程度と非常に小さくなっており、都市域に設置された測定局に比較して日変動が少ないことを示している。本計算では、このようにオゾンの日較差が大きい地域を「汚染域」、日較差が小さい地域を「後背地域」と位置づけ、それぞれの地域において船舶起源の VOC の影響を評価していくこととする。

(c) オゾン濃度と他の汚染物質の関係

最後に NMHC、NO_x、O₃ 濃度の関係を概観する。2002 年における汚染域である関東 7 局において、7,8 月期の昼間における、NMHC、NO_x、O_x の 3 次元散布図を図 58 に示した。図では NMHC 濃度(ppmC)を X 軸に、NO_x 濃度(ppb)を Y 軸に、O₃ 濃度(ppb) を、Z 軸とする代わりにプロットする点の色分けで示しており、0~30 ppb 青、30~60 ppb 水色、60~90 ppb 緑、90~120 ppb 橙色、120~150 ppb 赤と色分けしている。一点はある 1 時間値が NMHC、NO_x、O_x の濃度の組み合わせで観測されたことを示している。図 58 には、測定局ごとのプロットと 7 地点を同じ座標軸にプロットしたものを示している。

第一に特徴的なのは、千葉県市原市岩崎西を除くと、NMHC/NO_x 比(グラフの傾きの範囲)がどの地点もほぼ一定の範囲内に収まり、かつ原点を通っているという点である。両排ガスは、2 章で述べたようにその排出機構が全く異なるが、地域全体で平均的に見た場合ほぼ社会活動量に比例して排出されること、特に夏場は夜間においても上層との混合が活発であり、前日の汚染物質が同時に希釈されることなどから、原点を通る一定の範囲内に収まることがわかる。

第二に、NMHC 及び NO_x 濃度の絶対値は、群馬県など内陸部に進むにつれて次第に減少することがわかる。これは、沿岸部において海岸立地の固定発生源および自動車交通量が多く

なり、その直接的な排出が内陸部に進むに従い、拡散または沈着酸化過程により消費されることで説明できる。千葉県市原市岩崎西は、周辺を石油コンビナートで囲まれた特殊な立地条件にあり、その局地的な影響を強く受けているものと考えられる。

第3に、オキシダントの高濃度出現条件(図中緑以上の点が、環境基準値である60ppbを越える時間である)。緑色の点は、NMHC及びNOx濃度の絶対値には余り影響されず、むしろやや低濃度の時にも発現していることがわかる。また、NMHC/NOx比の範囲で見ると、傾きが小さい時、つまり、NMHC濃度に比較して、NOx濃度が小さい時に、むしろO₃高濃度が発現していることがわかる。このことは、NOx規制が更に進み、NOx環境濃度が下がると、O₃濃度が上昇する危険性があることを示唆している。

このように、高O₃濃度はNMHC、NOxの絶対値よりもNMHC/NOx比に影響されること、比較的内陸部まで、特徴とされるNMHC/NOx比は保存されることが、この解析結果から導かれる。逆にコンビナートのように、局所的排出源の影響を強く受ける測定点は、少なくともO₃濃度に関しては地域全体を代表するものではないと考えられる。

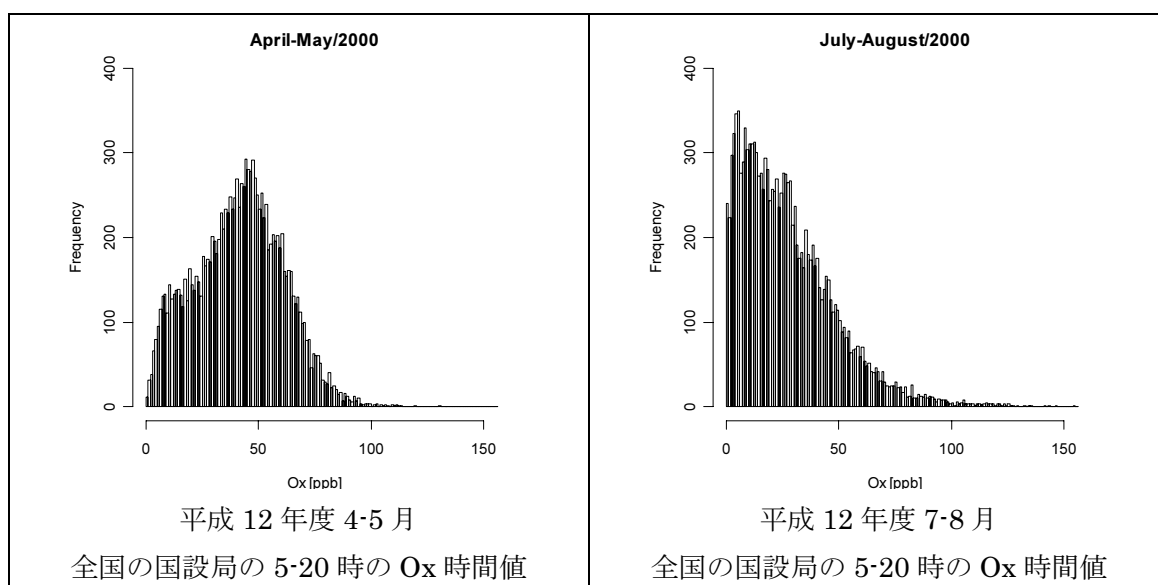


図 53 国設測定局における昼間のオキシダント濃度の頻度分布の月別比較
(横軸はオキシダントの1時間値、縦軸は出現時間数、対象は平成12年度の全国設常監視測定局)

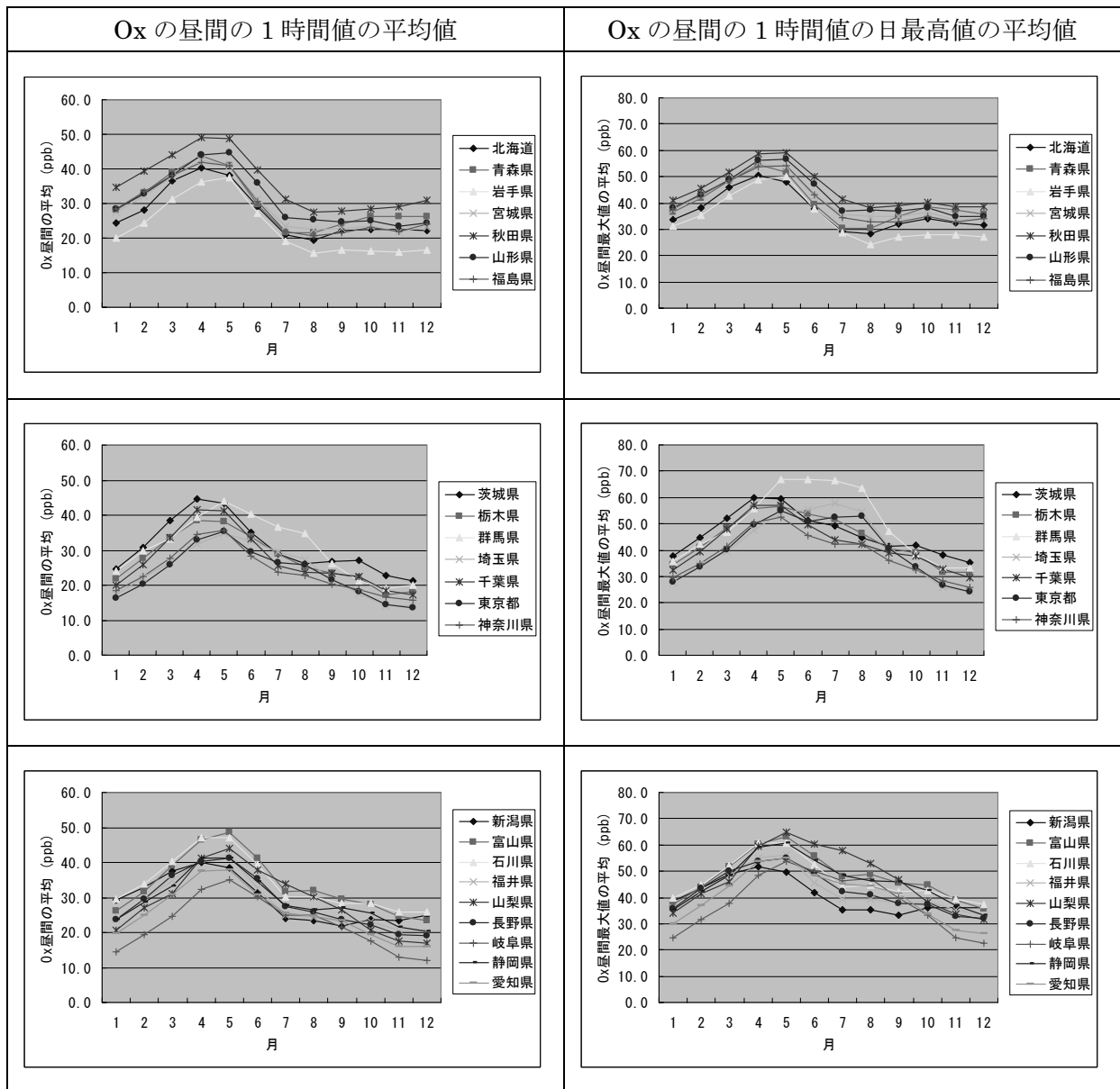


図 54 都道府県別オキシダント濃度指標の月別変化(その 1)

(左図は、各都道府県内の全ての一般局について、平成元年度～平成 12 年度までの昼間 5:00～20:00 の 1 時間値 15 個を単純平均したもの。右図は、同様に毎日の 1 時間最高値を月ごとに平均したもの。「大気汚染状況報告書」より作成)

Ox はオキシダント濃度を表わしているが、その 95%以上が O₃ 濃度で代表される。

また、一部の測定局ではオキシダント濃度はなく、O₃ 濃度を観測している

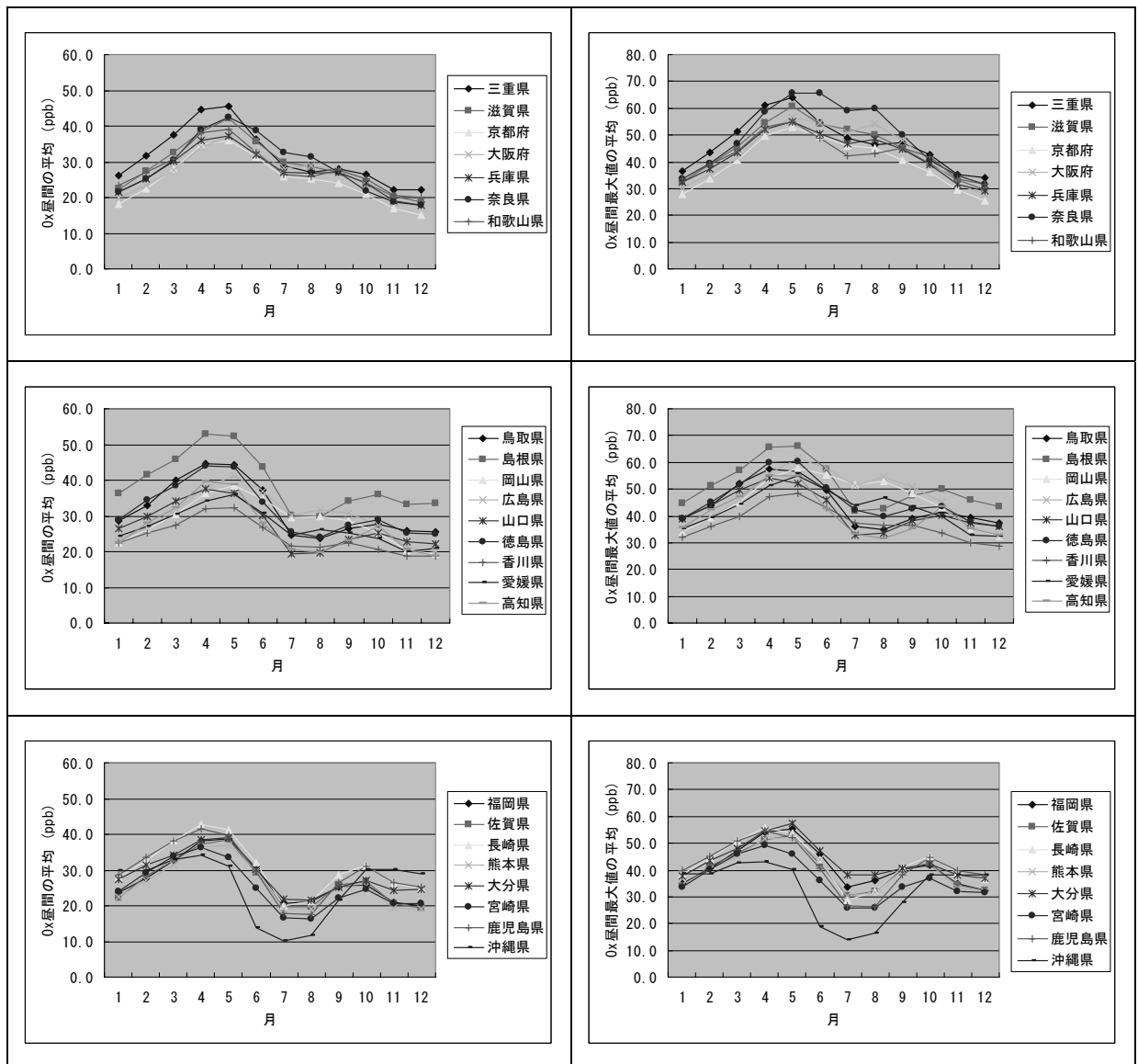


図 55 都道府県別オキシダント濃度指標の月別変化(その 2)

(左図は、各都道府県内の全ての一般局について、平成元年度～平成 12 年度までの昼間 5:00～20:00 の 1 時間値 15 個を単純平均したもの。右図は、同様に毎日の 1 時間最高値を月ごとに平均したもの。「大気汚染状況報告書」より作成)

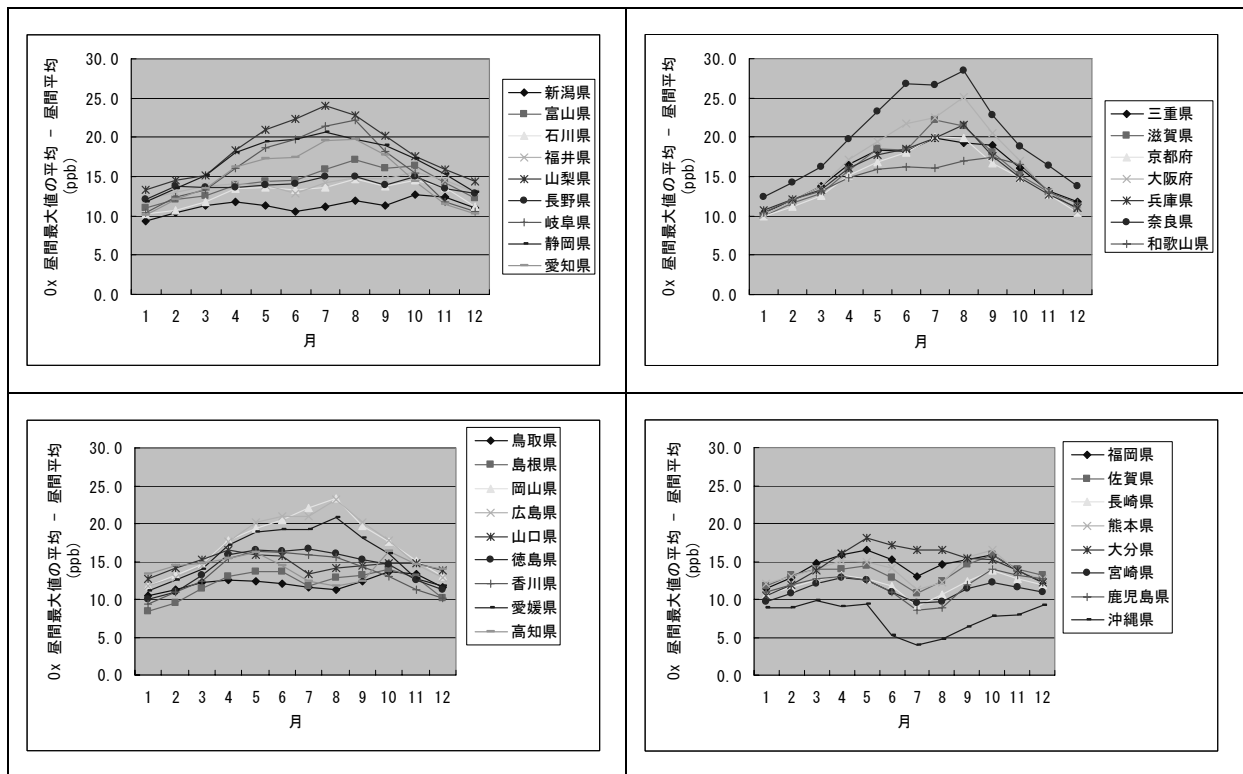
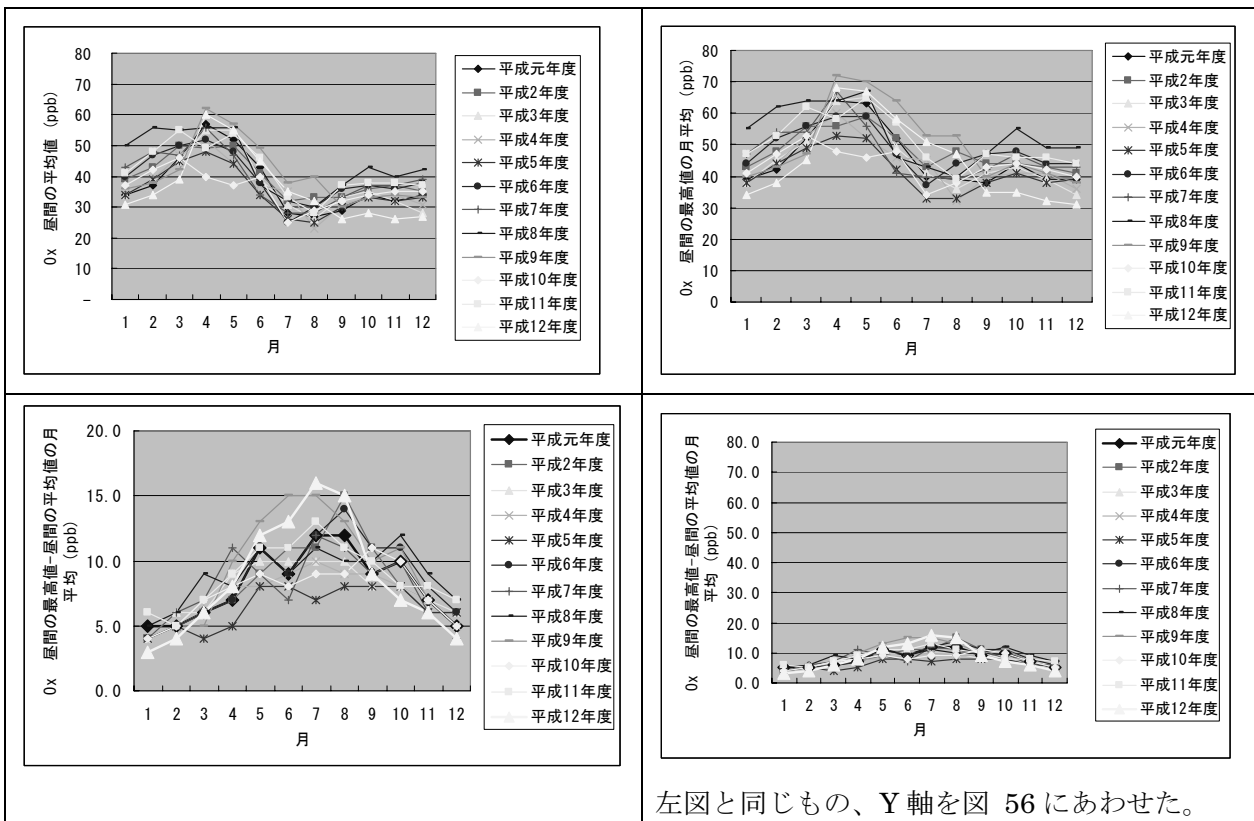


図 56 都道府県別オキシダント濃度の日較差の月別変化

(昼間 5:00~20:00 の 1 時間最高値から昼間の日平均値との差の月平均値、対象は各都道府県内の全ての一般局)



左図と同じもの、Y軸を図 56 にあわせた。

図 57 国設笹岳におけるオキシダント濃度指標の月別変化
(昼間の月平均値、昼間の 1 時間最高値の平均値、および日較差)

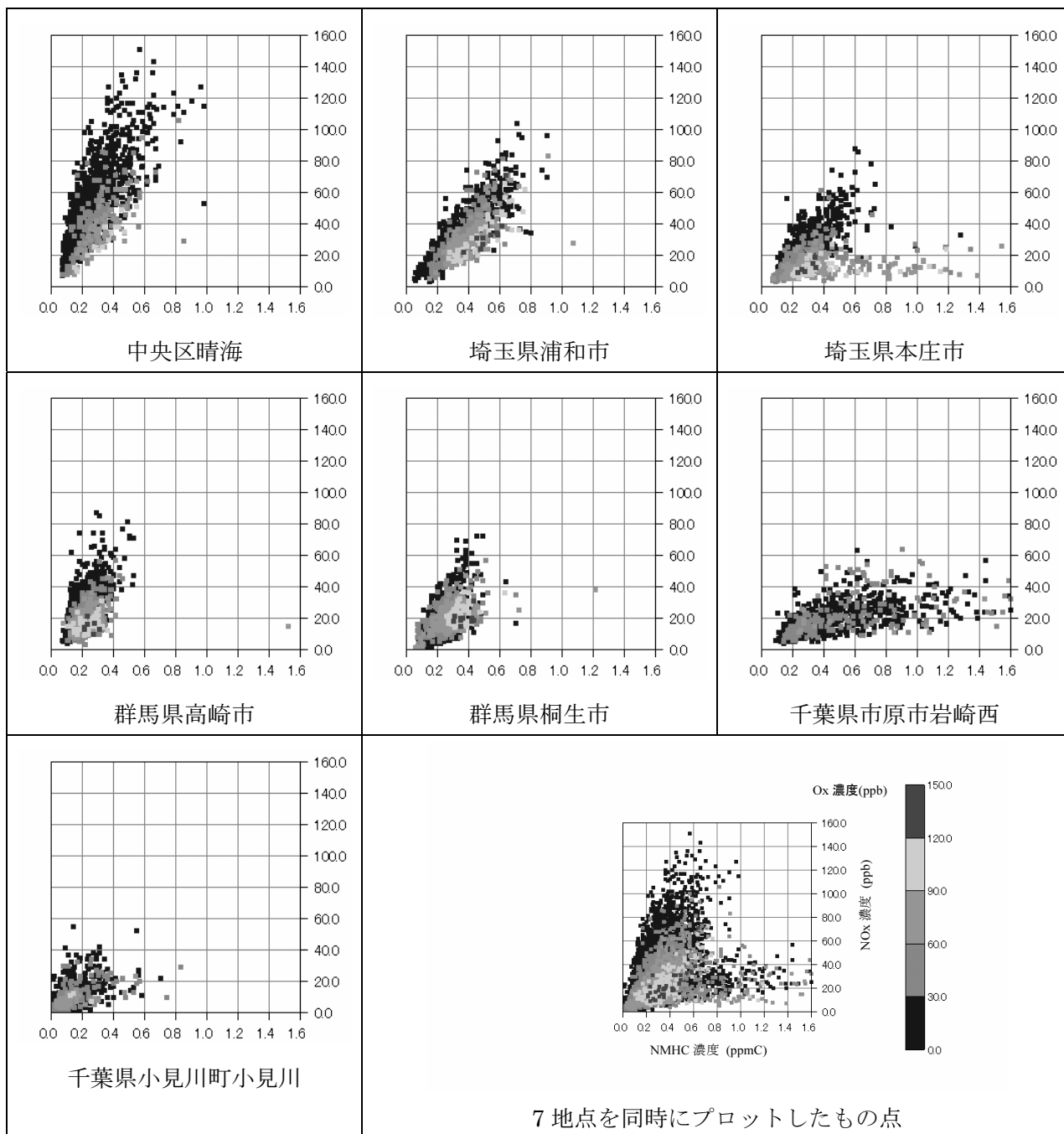


図 58 関東の一般局における平成 12 年 7,8 月における NMHC、NOx、オキシダントの相関関係
(横軸 NMHC(ppmC)、縦軸 NOxppb、オキシダント濃度は色分け)

NMHC 1 時間値 ppmC
 NOx 濃度 1 時間値 ppb
 Ox 濃度 1 時間値 ppb
 観測地点 関東 7 局

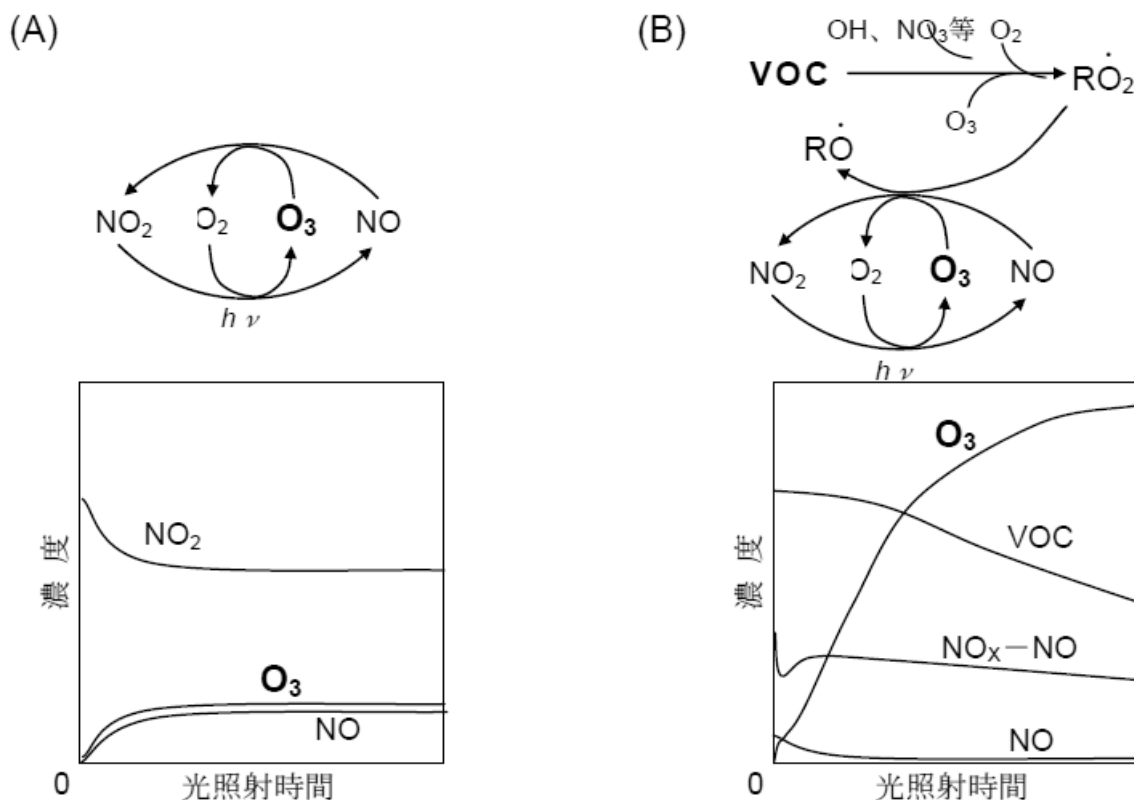
東京都	中央区晴海
埼玉県	浦和市役所、本庄市本庄
群馬県	高崎市勤労ホーム駐車場(NMHC のみ高崎自排)、群馬県桐生市東小学校(NMHC のみ桐生自排)
千葉県	市原岩崎西、小見川町小見川

2.7.2 シミュレーションモデルによる船舶起源の VOC の大気環境への影響分析

環境省の VOC 検討分科会の資料によれば、オゾン生成に関与する VOC の寄与は以下のよう

に説明される。二酸化窒素 (NO_2) は太陽光の照射を受けて一酸化窒素 (NO) と原子状酸素 (O) に分解する。生成した O は直ちに酸素 (O_2) と反応してオゾン (O_3) を生成する。その後、 O_3 は NO と反応して NO_2 と O_2 を生成する。大気中に VOC が存在しない場合は、図中(A)に示すようにこれらの反応が平衡状態になるため、 NO 、 NO_2 及び O_3 はある一定濃度になる。

しかし、大気中に VOC が存在する場合は、VOC が OH ラジカルや O_3 等と反応してアルキルペルオキシラジカル ($\text{RO}\cdot^2$) を生成する。この $\text{RO}\cdot^2$ が NO と反応してアルコキシラジカル ($\text{RO}\cdot$) となる反応と、 O_3 が NO と反応して NO_2 となる反応が競合するため、図(A)の平衡状態がずれて O_3 濃度が増加する。ここでは、VOC のオゾン濃度の寄与に関して、更に定量的に把握することで、船舶から発生する VOC が大気環境特にオゾン濃度に対してどのような影響を及ぼしているのか、その定量的な把握を最新の光化学シミュレーションモデルを用いて検討するものとする。



出典：秋元ら（1978）より作成

図 59 オゾン生成への VOC の関与

(1)オゾン生成能に影響する因子

2.1 節で述べてきたように、VOC が大気環境特に環境オゾン濃度に与える実際の影響は、他の大気汚染物質の影響や VOC 自身の組成によるところが大きい。ここでは、このような複雑な VOC の反応性についてオゾンの生成能に着目し、過去においてどのような調査が国内外において行われてきたか、について概説する。オキシダントの生成能に大きく影響する因子としては、(a)大気中に存在する NO_x 濃度や NO_x 排出量、(b)VOC 自身の組成の違い、(c)光化学反応速度に直接影響する紫外線量などの気象因子、(d)他地域から移流するオキシダント量などが、考えられる。ここでは(a)(b)の2因子について更に詳しく考える。

(a) 大気中に存在する NO_x の影響

NO_x が非常に多く存在する地域においては、光化学反応によって大気中に生成したオゾンが、ただちに燃焼排出源からの NO と反応し消費されてしまうことが知られている。このため、オゾン濃度が低い一方、NO₂ 濃度あるいは NO_x 全体に占める NO₂ 濃度が高いといった現象が、特に大都市部においてはよく見られる。この場合、VOC 排出量あたりのオゾン発生量は、見かけ上小さく計算あるいは実測されることになる。また、清浄な地域においては、NO による消費も少ない代わりに、オゾンの材料となる NO ラジカルの存在量が少ないため、VOC を追加して排出しても光化学反応が最終生成物であるオゾンまで到達できない。このような場合にも、環境中オキシダント濃度は小さくなり、同時に VOC 排出量あたりのオゾン発生量も小さくなることが予想される。このように、一定の VOC 量に対して大気中のオキシダント濃度を最大にならしめる NO_x 量が存在すると言われている。図 60 に東京都の光化学オキシダント対策検討会によるシミュレーション計算結果を示す。NO_x 排出量を縦軸、VOC 排出量を横軸にとり、それぞれの排出量を現状値からその際に生成するオゾン生成量を Z 軸として等濃度線図としてプロットしたものである。ある一定の NO_x/NMHC 比の範囲で高いオゾン濃度が現出していることがわかる。

このように、NO_x の存在量あるいは NO_x/NMHC 比により、オゾン生成量(ΔO_3)あるいはオキシダント生成能($\Delta O_3/\Delta VOC$)が大きく変化することは、国内の多くの論文においても指摘されており、一般的な傾向であると考えられる。ただし、その実証フィールドは、関東・関西圏に限定されており、後背地域において最新の知見に基づく光化学反応シミュレーションを実施した例は非常に少ない。

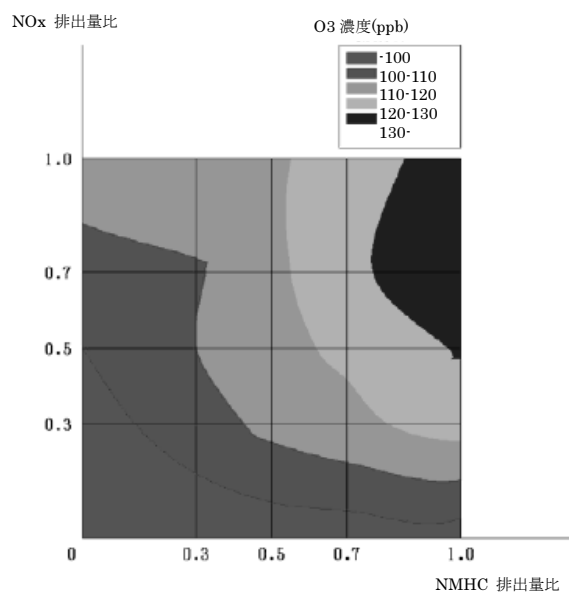


図 60 オゾン等濃度線図（2002年8月7日、東京都内最高濃度）
東京都、光化学オキシダント対策検討会報告書、平成17年2月から作成

(b) VOC 組成の違い

VOCがOHラジカルやO₃等と反応して代表的な中間生成物であるアルキルペルオキシラジカル (RO[·]2) を生成する速度は、その物質によって大きく異なる。一般に、アルデヒドや、カルボニル基、あるいはPAN(ペルオキシアセチルナイトレート、RC(O)OO NO₂)は、この中間生成物を早く大量に生成することが知られている。また、このような反応性のない物質であっても、大気中の光化学反応による分解・酸化過程において、同様の中間生成物が一時的に生じる可能性があるため、多くの VOC が、多かれ少なかれオキシダント生成能を有することが知られている。一般には、分子内に二重結合、アルデヒド基、あるいは環構造を有する物質の方が直鎖系の物質よりも光化学反応性(紫外線などにより活性化したり、分解したりする)が高く、結果としてオゾン生成能も高い。

物質ごとのオキシダント生成能の推定法としては、チャンバーと呼ばれる温室状の空間で、模擬気体に被対象物質の添加量を変化させながら、一定時間経過後のオゾン濃度を実測する方法と、光化学反応を一定程度単純化したモデルを用いる方法がある。本事業においては後者を用いる。

(2) 船舶起源 VOC のオゾン生成能に関する指標

排出 VOC のオゾン生成能は、VOC 排出量当たり大気中で生成されるオキシダント生成量と考えてよい。この指標は、(1)で述べたように、排出される VOC の構成物質により大きく異なるほか、気象条件、大気中に存在する VOC 量、構成比、NO_x 量、NO₂/NO_x 比など排出 VOC を受容する環境側の様々なパラメータにより影響されるため、一律に定めることは困難であるが、地域間の比較、物質間の比較を目的として、一般化あるいは無次元化した指標が幾つか提案されている。

環境省 VOC 検討会における検討によれば、オキシダント生成能として主に表 44 内に示す①から③の指標が知られている。このうち、①OH 尺度は物質の物性値から直接推定可能なものであり解り易い指標であるが、(1)で述べた影響因子を考慮したものではなく、あくまで OH 基との 1 対 1 反応速度を規定するものであること、オゾンの生成量と直接結びつきにくいパラメータであることから、本事業では採用しない。

これに対して、②最大増加反応性 (MIR: Maximum Incremental Reactivity) と③光化学的オゾン生成能 (POCP: Photochemical Ozone Creation Potential) はどちらも、単位物質から発生するオゾン量を示す値(いずれも無次元数であるが、前者が質量/質量、後者は質量濃度/質量濃度)である。

②MIR が、主に汚染が進んだ地域における最大オゾン生成量を示す指標として米国 (カリフォルニア州) で利用されているのに対して、③POCP はより汚染の少ない地域を含めて長時間にわたり移流する大気塊内におけるオゾン生成能を示す指標として、主として欧州で利用されている。

このうち、MIR は米国及び我が国において、オキシダント濃度の高い地域における物質ごとのオゾン生成能の計算に用いられており、米国においては 33 地域、環境省においては関東、関西の 2 地域に対する適用例がある、このため、今回はオゾン生成能として②MIR を採用することとした。

なお、試験的な計算によれば、航路帯からの排ガスに含まれる排出量はその絶対量あるいは他の排出量に対する割合が極端に少なく、計算上の誤差が大きいため、生成能としての評価が難しいことがわかった。このため、ここでは VOC のうち比較的高濃度で排出される荷役に伴う VOC 排出量を中心に扱う。

① OH 尺度 (OH Scale)

$$OH\ Scale = \frac{OH\ \text{と}\ VOC\ \text{の}\ \text{反応速度定数}\ (cm^3\ molecule^{-1}\ s^{-1})}{\text{分子量}\ (g\ molecule^{-1})}$$

OH との反応速度定数を分子量で除した値。

理解が容易な指標であるが、オゾン等他のオキシダントとの反応が反映されず、また、その後の反応過程で生じる反応性生成物の違いが反映されないなどの欠点がある。

② 最大増加反応性 (MIR: Maximum Incremental Reactivity)

$$MIR = \frac{\text{光化学オキシダント増加量}\ (mg)}{VOC\ \text{増加量}\ (mg)}$$

③ 光化学的オゾン生成能 (POCP: Photochemical Ozone Creation Potential)

$$POCP = \frac{VOC\ \text{排出による光化学オキシダント生成量}\ (\mu g / m^3)}{\text{一定時間内の}\ VOC\ \text{排出量}\ (\mu g / m^3)} \div \frac{\text{エチレン排出による光化学オキシダント生成量}\ (\mu g / m^3)}{\text{一定時間内のエチレン排出量}\ (\mu g / m^3)} \times 100$$

表 44 主なオキシダント生成能の指標

(3) 最大増加反応性(MIR)の使用例(環境省における計算方法紹介)

ここでは前節(2)で紹介した最大増加反応性(MIR)の環境省における使用例を紹介し、本事業における使用方法との違いについて述べる。環境省では、平成16年度大気汚染防止法の改正作業の際に、米国での使用方法を参考に国内において同様の使用を検討しており、最終的に同指標を用いて反応性を計算し、フロン類(HCFC)など計算MIRの低いVOCを除外物質として指定した経緯がある。本節では、環境省HPなどで公表されているVOC検討分科会及び同結果の計算方法に関する報告文章などを参考にして作成した。

MIRは、VOC排出量(kg)当たりの最大オゾン生成量(kg)として表現される。その具体的な計算イメージを

図61に示す。

米国の光化学反応モデルの使用マニュアルであるEKMAを参考に、光化学反応系にSAPRC-99モデルを、また計算領域として関東・関西を対象としたワンボックスモデルを採用している。ワンボックスモデルでは、移流項計算のための風系場などの気象モデルは用いず、ボックス内の物質濃度は場所に関わらず一定とするものである。ボックス内の濃度は、主に排出源からの物質の移入の時間変化、ボックス内の光化学反応の速度、気象条件などにより決定される。

図61の上段に示している基本ケースは、対象地域における大気汚染物質濃度及び排出量を入力し、予測されるオゾン存在量(=オゾン濃度×ボックスの体積で規定される)をそのまま計算したケースである。次段に示す追加ケースは、基本ケースに対して対象物質(本事業においては船舶起源VOCに相当する)を追加したケースである。第3段目には、上記の基本ケース、追加ケースの両ケースでそれぞれ計算されたボックス内のオゾン存在量の差異を示している。このオゾン存在量をVOC/NO_x比ごとに求め、VOC/NO_x比でプロットしたものが最下段の図である。

MIRの一つの特徴は、図の横軸に示しているようにVOC/NO_x比をパラメータ(実際にはNO_x排出量と初期存在量のみを変化させる)として感度解析を行い、その中で生成能のうち最も高いものを選択することにある。つまり、実際にある地点において測定されるVOC/NO_x比とは異なったポイントを含めて、その地点における潜在的な最大オキシダント生成能を算定する方法である。

実際の基本ケースにおける、計算方法の概要を表46から表50及び

図61から図63に示した。基本ケースの作成には、算定地点の気象条件、排出量、初期濃度などから高濃度日の現況の再現を行う。

主なVOC個別物質の国内におけるMIR計算結果と米国におけるMIR計算結果との比較を表51及び図66に示した。日米の対象地域の違いによるMIRの差異は実用上問題がない範囲となっており、MIRがほぼ物質特性にのみ依存する指標であること、同指標を国内において適用しても実用上問題ないことが結論付けられた。ただし、Maximum IRは実際の関東関西における現況VOC/NO_x(NMHC/NO_x)比とは異なる状況で現出する。具体的には現況よりもNO_x濃度が低くVOC/NO_xが高い計算条件、つまり現況より更にNO_x排出量が削減された条

件下で最大値を示すことが多い。つまり、MIR は、我が国の現況でのオゾン生成能および生成量を必ずしも示しているものではないことには留意する必要がある。

以上の算出方法を、本事業においても参考にしながら、船舶起源の VOC の環境影響を定量的に評価するために、光化学シミュレーションを行った。環境省の計算との相違点は、表 45 に示すとおりである。

主な目的は、(1)ガソリンや原油のような混合物質の荷役に伴う VOC によるオゾン生成能を、個別の単独物質の生成能と比較することでオゾン前駆体の物質としての評価を行うこと、(2)季節・地域間によるオキシダント生成能の違い、あるいは添加量の違いによるオキシダント生成能の違い、などから、船舶起源 VOC の我が国大気環境への影響について検討することである。

これらの計算のため、環境省の使用方法をベースにして、地域的には後背地域である鹿児島市を対象にし、また混合物質をその組成のまま追加して光化学反応性をシミュレーションした。

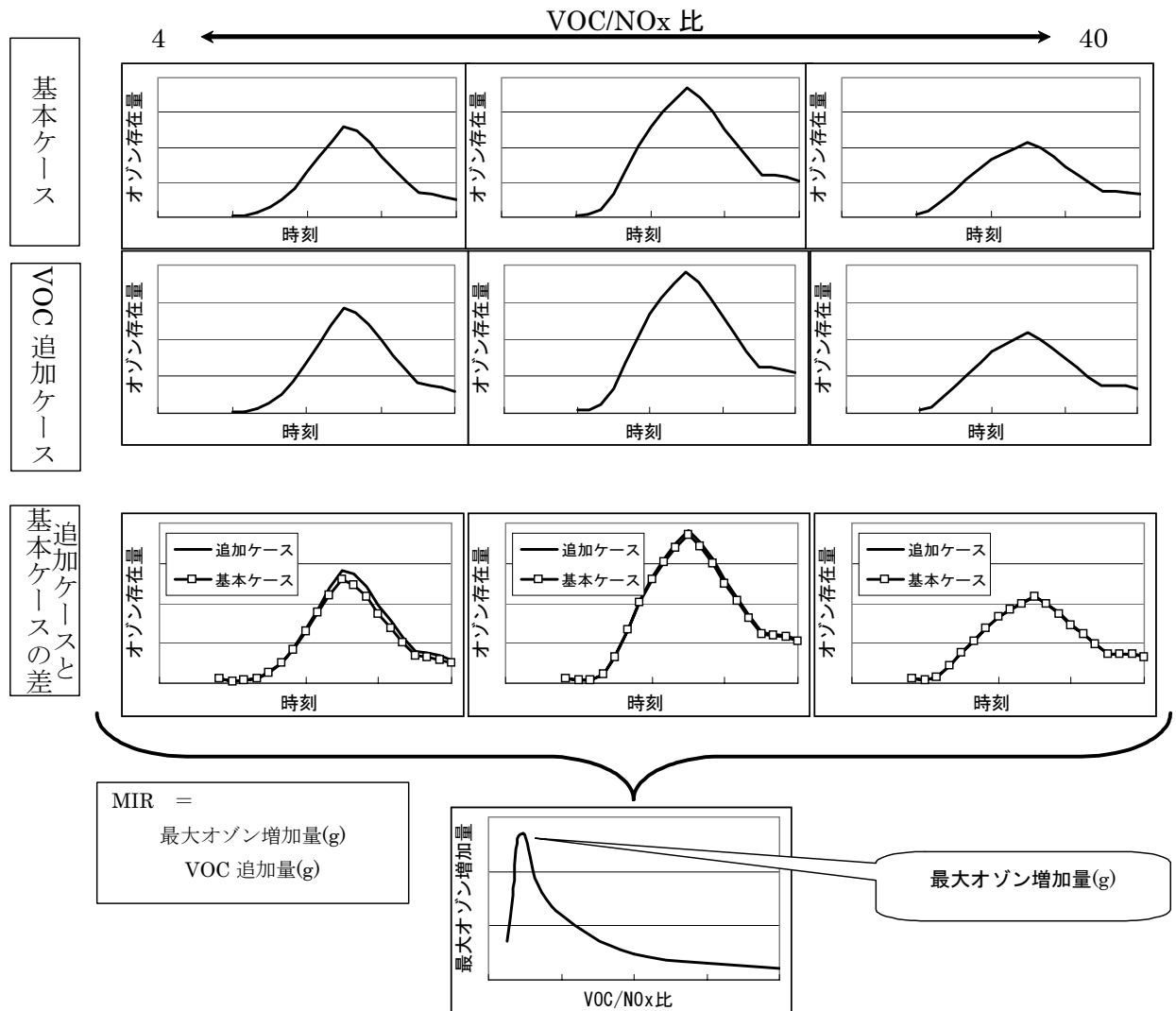


図 61 オゾン生成シミュレーションモデルの計算結果イメージ

- (1) 基本ケースに対して VOC/NO_x 比がおおよそ 4~40 となるよう、NO_x 初期濃度及び排出量をそれぞれ現況の 50~200%まで変化させ、それぞれのケースでボックス内の最大オゾン存在量を計算する。
- (2) 調査対象となる個別 VOC を、全ての VOC の初期濃度及び排出量に対し 5%追加した上で、基本ケースと同様に NO_x 初期濃度及び排出量を変化させ、それぞれのケースでボックス内の最大オゾン存在量を計算する。
- (3) (1) と (2) のオゾン存在量の差を VOC/NO_x 比ごとに求め、このうちの最大量を (2) の VOC 追加量で除した値が MIR となる。

表 45 環境省と本事業の光化学シミュレーション計算の比較

	環境省	本事業
対象地点	関東、関西 (汚染域のみ)	左記 2 地点に加えて後背地域
対象季節	夏季のみ	関東、関西について春季も実施
追加 VOC 物質	代表的な VOC 約 50 種 (ただし単独物質として追加)	ガソリン、原油の荷役由来 VOC2 種 (ただしいずれも混合物として追加)
追加 VOC 量と 時間変化	どのケースも 5 % で固定	左記に追加し、 仮想的な荷積みターミナルを想定
オゾン生成能 の評価	MIR のみ (現況 NO _x /NMHC 比と異なる場合がある)	MIR に加えて現況 NO _x /NMHC 比での 生成能も評価する

表 46 環境省の MIR 計算における計算方法概要

モデル	SAPRC-99(カリフォルニア大学 Carter による米国での MIR 評価モデル)
反応式・定数	Carter 提供の反応式・定数を使用 Carter の対象外物質(フロン等)は文献に基づき、OH ラジカルとの反応速度などから米国での方法に準じて設定
対象地域	関東(東西 70 km×南北 70 km)ならびに関西(東西 30 km×南北 40 km)
VOC	環境省過去調査より、初期濃度、排出量、成分構成を設定
NOx	環境省過去調査より、初期濃度、排出量、成分構成を設定
気象条件	2002 年 7,8 月の高オゾン日の気象条件より設定

- 平成 13 年度 炭化水素類排出抑制対策技術動向調査報告書(平成 14 年 3 月、財団法人日本システム開発研究所)
- 平成 13 年度 浮遊粒子状物質総合対策に係る炭化水素類発生源情報整備(平成 14 年 3 月、株式会社数理計画)
- 平成 15 年度 浮遊粒子状物質性分別環境濃度解析調査報告書(平成 16 年 3 月、財団法人日本気象協会)
- 大気環境時間値データファイル(独立行政法人国立環境研究所環境情報センター)

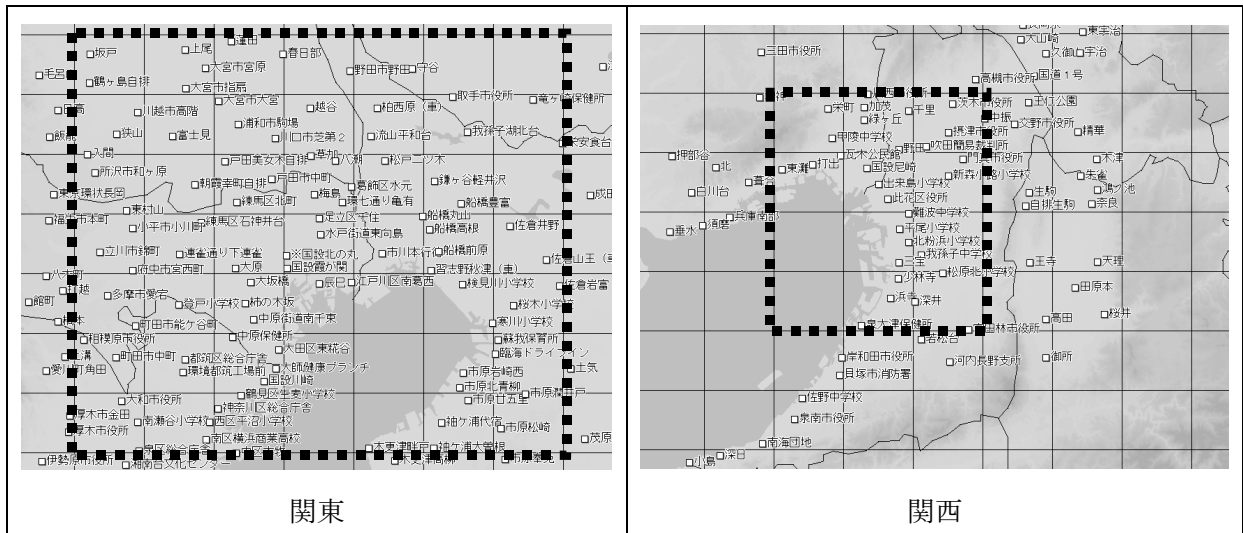


図 62 計算対象領域(地図中口は大気汚染常時監視測定局)

表 47 環境省の MIR 計算における NOx・VOC の初期濃度・排出量

	初期濃度		排出量(g/km ² /日)		
	Ox(ppm)	NMHC(ppmC)	NOx(ppm)	VOC	NOx
関東	0.0196	0.453	0.0742	182,024	99,076
関西	0.0144	0.336	0.0463	305,022	155,567

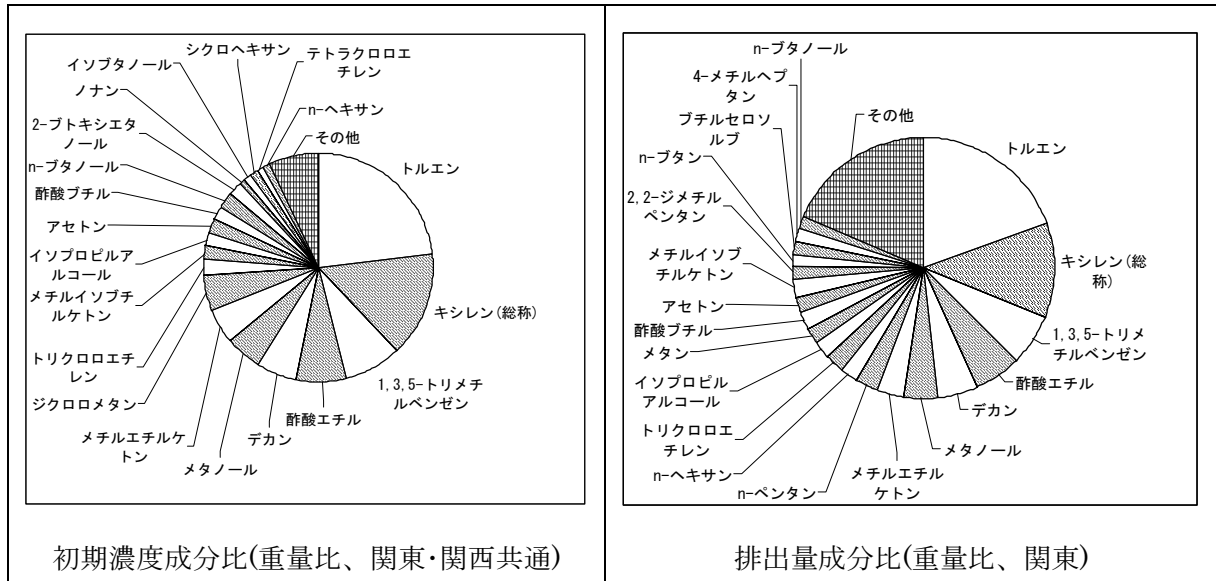


図 63 環境省の MIR 計算における VOC 成分比

- 成分比は、初期濃度で 27 種、排出量で 62 種の VOC を設定した。図では排出量上位 20 位以内のみの物質名を表示した。

CBM-IV	SAPRAC99
反応式×86・反応種×33	反応式×187・反応種×54
成分名→モデル中での扱い プロピルベンゼン→PAR×2+TOLU×1 i-トリデカン→ PAR×13 C7 シクロパラフィン類→PAR×7	成分名→モデル中での扱い n-ブタン → n-C ₄ イソブタン → 2-ME-C ₃
直鎖と側鎖、異性体は同じ扱い。 UAM(Urban Air Shed Model)に組み込み	直鎖・側鎖は異なる(上述)。異性体は同じ扱い。 CIT(California Institute Model)に組み込み (SAPRAC90)
ハロゲン基の反応は考慮しない。	ハロゲン基の反応は考慮しない。
C-C, C=C, C ₆ H ₅ -CH ₃ , CH ₃ OH, C ₂ H ₅ OH, CH ₂ =CH ₂ , C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	CH ₃ ·, ·CH ₂ ·, >CH·, >CH<, ·O·, ·OH, ·CHO, ·CO·, ·ONO ₂ , CH ₂ , =CH·, =C< 複数の二重結合 C は対象外

表 48 環境省の MIR 計算における光化学反応モデル
 (左欄は従来用いられていた光化学反応モデル)

EKMA (Empirical Kinetic Model Analysis)
EPA のガイドライン(Guideline for Use of City-Specific EKMA in Preparing Ozone SIPs, EPA-450/4-80-027, March, 1981)である。 光化学反応・拡散モデルと回帰モデルのギャップを埋めるために用いられてきた。 光化学反応モデルとしては CBM-IV を用いている。 ワンボックスに、測定された都市大気環境をインプット、複数のデータセットについて計算を行うことにより、NO _x ・NMOC 平面上の O _x 等濃度線を求める。 ガイドラインとしては、都市ごとの VOC 対策に使うことを想定している。

表 49 環境省の MIR 計算における光化学反応モデルの利用手法

表 50 代表的なメカニズムと反応定数

物質	k(298)	定数			反応(計算のため略式化している)
		A	Ea	B	
メタン Methane	6.36e-15	2.15e-12	3.45	0.0	METHANE + HO. = C-O ₂ .
エタン Ethane	2.54e-13	1.37e-12	0.99	2.0	ETHANE + HO. = RO ₂ -R. + CCHO(アセトアルデヒド)
エチレン(エテン) Ethene	8.52e-12	1.96e-12	-0.87		ETHENE + HO. = RO ₂ -R. + #1.611 HCHO + #.195 CCHO
	1.59e-18	9.14e-15	5.13		ETHENE + O ₃ = #.12 HO. + #.12 H O ₂ . + #.5 CO + #.13 CO ₂ + HCHO + #.37 HCOOH
	2.05e-16	4.39e-13	4.54	2.0	ETHENE + NO ₃ = RO ₂ -R. + RCHO + #-1 XC + XN
	7.29e-13	1.04e-11	1.57		ETHENE + O ₃ P = #.5 HO ₂ . + #.2 RO ₂ -R. + #.3 C-O ₂ . + #.491 CO + #.191 HCHO + #.25 CCHO + #.009 GLY + #.25 INERT + #.25 XC
α-ピネン α-Pinene	5.37e-11	1.21e-11	-0.88	0.0	A-PINENE + HO. = #.75 RO ₂ -R. + #.25 RO ₂ -N. + #.5 R ₂ O ₂ . + #.75RCHO + #6.5 XC
	8.65e-17	1.01e-15	1.46	0.0	A-PINENE + O ₃ = #.7 HO. + #.081 RO ₂ -R. + #.321 RO ₂ -N. + #1.375R ₂ O ₂ . + #.298 RCO-O ₂ . + #.051 CO + #.339 HCHO + #.218 RCHO + #.345 ACET + #.002 GLY + #.081 BACL + #.3 RCO-OH + #3.875 XC
	6.16e-12	1.19e-12	-0.97	0.0	A-PINENE + NO ₃ = #.75 NO ₂ + #.25 RO ₂ -N. + #.75 R ₂ O ₂ . + #.75RCHO + #6.25 XC + #.25 XN
	3.20e-11	3.20e-11	0.00	0.0	A-PINENE + O ₃ P = PROD2 + #4 XC
塩化メチル Methyl Chloride	4.36e-14	3.15e-13	1.16	2.0	CH ₃ -CL + HO. = RO ₂ -R. + #.5 HCHO + #.5 RCHO
ジクロロメタン Dichloromethane	1.42e-13	7.69e-13	0.99	2.0	CL ₂ -ME + HO. = RO ₂ -R. + #.5 HCHO + #.5 RCHO
1,1,1-トリクロロエタン 1,1,1-Trichloroethane	1.19e-14	5.33e-13	2.24	2.0	111-TCE + HO. = RO ₂ -R. + #.5 HCHO + #.5 RCHO

- $$k = A \cdot \exp\left(-\frac{Ea}{R \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^B$$
- DOCUMENTATION OF THE SAPRC-99 CHEMICAL MECHANISM FOR VOC REACTIVITY ASSESSMENT の APPENDIX A. MECHANISM LISTING AND TABULATIONS(s99ppa.pdf)より作成
- VOC に対する初期反応として、OH、O₃、NO₃、O₃P との反応が行われる。
- O₃P 又は O(³P)は、基底状態の酸素原子である。O₃ の光解離で生じる酸素原子はλ<320nm では主として励起された一重項状態の O(¹D)であるが、λ>320nm では O(³P)である。波長λ>280nm の短波長紫外線(UVC)は、オゾン層で吸収されることから、地上付近にはほとんど到達しない。
- HO.は OH ラジカルを、C-O₂. は CH₃OO.メチルペロオキシラジカルを示す。R は有機鎖を示す。XC、XN はそれぞれ失われた炭素、窒素原子を示す。
- O₂は遍在しているとして、反応式に入れていないと推測される。(METHANE + HO. = C-O₂. は、通常 CH₄+HO.→CH₃+H₂O, CH₃+O₂→CH₃OO.の二段階の反応を 1 計算で処理していると考えられる)。

反応は、計算のためにモデル化されたものであり、実際の反応式とは厳密には一致しない。

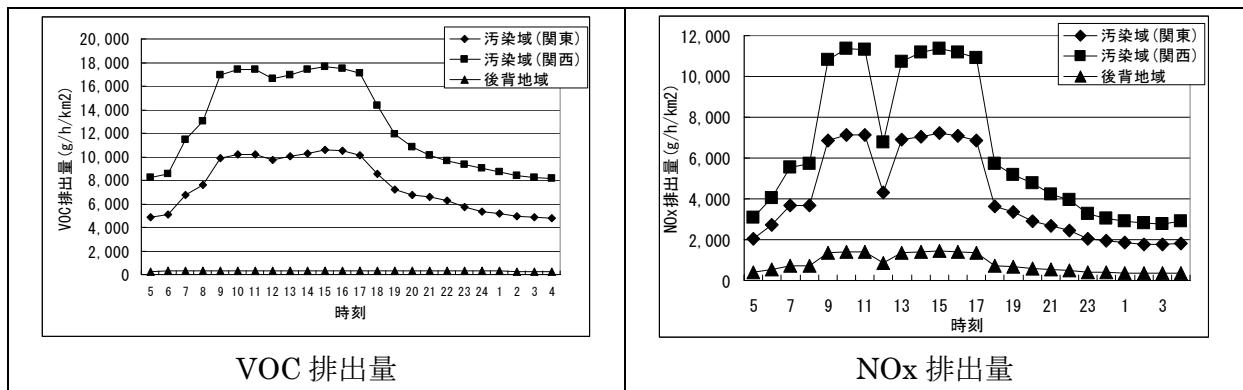


図 64 本計算における VOC,NOx 排出量
(汚染域(関東関西)における排出パターンは、環境省計算と同一である)

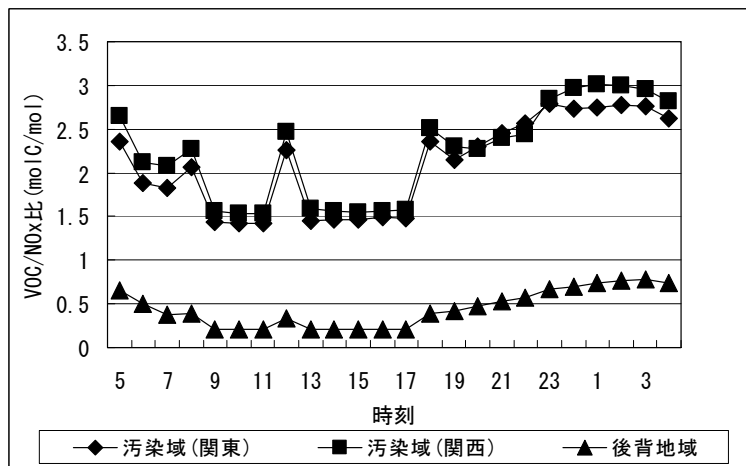


図 65 環境省計算における各地域の時間毎の VOC/NOx 比(molC/mol)
(汚染域(関東関西)における排出パターンは、環境省計算と同一である)

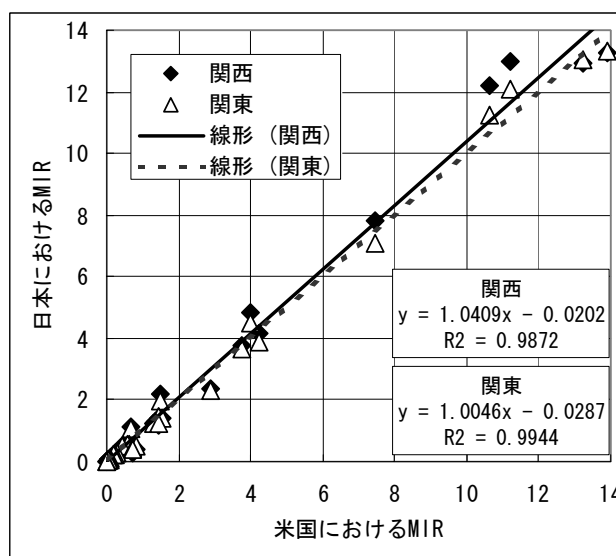


図 66 環境省の MIR 計算と米国 MIR の比較

表 51 各 VOC のオゾン生成能算定結果

物質	米国			日本(関東・関西平均)			米国比
	MIR	順位	メタン比	MIR	順位	メタン比	
trans-2-ブテン	13.90	38	1,000.0	13.28	38	907.6	96 %
cis-2-ブテン	13.22	37	951.1	13.00	37	888.5	98 %
1,3,5-トリメチルベンゼン	11.22	36	807.2	12.54	36	857.3	112 %
m-キシレン	10.61	35	763.3	11.71	35	800.4	110 %
o-キシレン	7.48	34	538.1	7.45	34	509.5	100 %
トルエン	3.97	32	285.6	4.66	33	318.6	117 %
p-キシレン	4.24	33	305.0	4.04	32	275.9	95 %
エチルセロソルブ(エチルグリコール)	3.76	31	270.5	3.69	31	252.5	98 %
ブチルセロソルブ	2.88	30	207.2	2.34	30	160.2	81 %
メチルエチルケトン	1.48	28	106.5	2.10	29	143.5	142 %
シクロヘキサン	1.44	27	103.6	1.42	28	96.9	98 %
n-ペンタン	1.53	29	110.1	1.40	27	95.9	92 %
イソブタン	1.34	25	96.4	1.29	26	88.2	96 %
n-ブタン	1.32	24	95.0	1.25	25	85.5	95 %
n-ヘキサン	1.43	26	102.9	1.21	24	83.0	85 %
メタノール	0.69	20	49.6	1.10	23	75.3	160 %
酢酸エチル	0.64	19	46.0	0.60	22	41.0	94 %
トリクロロエチレン	0.6	18	43.2	0.59	21	40.2	98 %
アセトン	0.43	17	30.9	0.50	20	34.0	116 %
イソプロピルアルコール	0.71	21	51.1	0.47	19	32.2	66 %
デカン	0.81	23	58.3	0.46	18	31.4	57 %
ウンデカン	0.72	22	51.8	0.32	17	22.0	45 %
エタン	0.31	16	22.3	0.30	16	20.3	96 %
クロロエタン(塩化エチル)	0.25	15	18.0	0.25	15	17.1	100 %
p-ジクロロベンゼン	0.2	13	14.4	0.21	14	14.4	105 %
酢酸 tert-ブチル	0.2	13	14.4	0.20	13	13.6	100 %
1,2-ジクロロエタン(二塩化エチレン)	0.098	12	7.1	0.106	12	7.3	108 %
酢酸メチル	0.073	10	5.3	0.081	11	5.5	111 %
ギ酸	0.076	11	5.5	0.076	10	5.2	100 %
ジクロロメタン	0.066	9	4.7	0.070	9	4.8	106 %
ギ酸メチル	0.064	8	4.6	0.067	8	4.6	105 %
1,1,2-トリクロロエタン	0.058	7	4.2	0.064	7	4.3	110 %
テトラクロロエチレン	0.04	5	2.9	0.046	6	3.2	115 %
エチレンオキシド(酸化エチレン)	0.044	6	3.2	0.045	5	3.1	103 %
クロロホルム	0.034	3	2.4	0.038	4	2.6	113 %
クロロメタン(塩化メチル)	0.034	3	2.4	0.036	3	2.5	106 %
メタン	0.0139	2	1.0	0.0146	2	1.0	105 %
HCFC-225ca	—	—	—	0.0058	—	0.4	—
1,1,1-トリクロロエタン	0.0036	1	0.3	0.0055	1	0.4	154 %
HFC-43-10mee	—	—	—	0.0040	—	0.3	—
HCFC-22	—	—	—	0.0039	—	0.3	—
HCFC-142b	—	—	—	0.0035	—	0.2	—
HCFC-141b	—	—	—	0.0031	—	0.2	—
HCFC-225cb	—	—	—	0.0029	—	0.2	—
HCFC-124	—	—	—	0.0027	—	0.2	—
四塩化炭素	—	—	—	0	—	0.0	—

※ 抽出した物質は(1)国内の代表使用物質、(2)低MIR物質、(3)フロン類である。

※ 順位は米国において計算対象となっている物質にのみ付した。

(4) 本事業における MIR の計算方法

表 52 に、環境省での使用例を参考にした本事業におけるオキシダント生成能の計算概要を示した。なお、シミュレーション計算作業および基本ケースにおける計算結果の妥当性の検討作業については、日本エヌ・ユー・エス株式会社が行った。

対象地点として、オゾンが夏季において高く現出する汚染域の代表的な地域としては(2)節で紹介した環境省の計算対象域である関東及び関西地域を選択した。また、オゾン濃度が汚染域ほど上昇せず、域内の NO_x、VOC 排出量も汚染地域より少ない地域を後背地域として定義し、鹿児島市付近の南九州地域を選定した。

計算対象年は、(2)節で紹介した環境省における計算使用例との比較のため、平成 14 年データを用い、VOC を追加しない基本ケースについては、環境省の MIR と同一のデータセットを用いた。また、後背地域についても、関東・関西と同様の方法を用いて夏季の高濃度日の抽出を行った。後背地において、明確なオゾン高濃度現象は、台風通過後の広域的な西風の出現時に現れることが解った。

図 68 には、抽出された高濃度の平均気象条件を用い、ワンボックスの高さを規定する混合層高さの推定結果を示した。混合層高さの計算では、環境省の MIR 算定事業と同じ計算方法を採用した。高層気象観測データなどから、混合層高度の最大・最低値を抽出し、同高度を日中は時刻ごとの日射量の変化および夜間は平均風速で内挿したものである。

表 55 には、各地域における現状再現の指標となる当日のオゾン日最高濃度と、それをモデル上で再現するための、基礎条件である O₃、NMHC(非メタン炭化水素)、NO_x の各濃度の初期設定及び計算日の 24 時間までの面積あたりの排出量強度を示した。初期濃度は、各地区の高濃度日における午前 5 時の実測濃度、また日排出量は同地区内で環境省の排出量推定値などから求めた。なお、鹿児島市においては、関東関西地区に比較して NO_x 及び VOC 排出量に関する基礎データが少ないため、モデルにおいてパラメータチューニングを行い、NO_x、O₃ 濃度の日変化への合わせ込みを行った。

表 55 および図 69 の各地域における実測オゾン日最高濃度をみると、関東は後背地域の絶対濃度で約 2 倍、図 69 における日較差も 1.5 倍程度となっており、後背地域においては生成オキシダントの絶対量は汚染域に対しておよそ半分程度になっていると考えられる。表 55 には同時に、初期濃度及び排出量のそれぞれについて、NMHC/NO_x 比を示した。オゾン濃度及び NMHC 濃度の初期値は、汚染地域に対して後背地域では、半分程度になっている。一方、NO_x 濃度については 1/20 程度にまで小さくなっている。夜間のうちに海上の空気塊が流入し、地上発生源の影響の少ない清浄な大気との交換が行われていると考えられる。地域間の O₃・NMHC 濃度の減少率と NO_x の減少率が異なる点は、海洋上の大気にも長距離移流による O₃ バックグラウンド濃度があること、NMHC については海洋表面などからの天然起源由来の VOC 寄与があり、長距離移流では乾性沈着などで減衰し、かつ海上に発生源のない NO_x との違いが出ているものと考えられる。

(a) 基本パターンの現状再現性

図 69 に、船舶 VOC を追加する前の基本ケースの現状の再現状況を示した。3 地域ともに夏季、春季の再現を行った。主なパラメータチューニングの対象は、①混合層高さの初期設定(地面粗度や海陸風の吹込みなどにより初期高度は影響されることが知られている)、②混合層上空のオゾン濃度(長距離移流や成層圏下部よりの供給などにより上空オゾン濃度も変化する。モデル上は①の混合層上昇に伴いこの上空オゾンがボックス内に供給され正午までのオゾン濃度上昇に大きく寄与する)、③VOC 組成(初期は実測値、日排出量は環境省の推計値を用いた)などである。

春季については他地域からの移流が大きく影響していると思われる高濃度日が抽出されるため、本事業において十分な再現性を得ることは至らなかった。このため、今回は関東については夏季・春季、関西及び後背地域については夏季について、以降の計算を行うこととした。これらのケースでは、図 69 に示したように、O₃ 濃度、NO_x 濃度ともに、高濃度の O₃ 出現状況を十分に再現していると考えられる。

ただし、後背地域においては、VOC 組成データ及び日排出量データの整備状況が関東関西より劣っており、特に VOC 組成の測定例が非常に少ないことがわかった。このため、組成を汚染域に比較して反応性の少ないものに変更している。オキシダントの日変化への再現性については充分であるものの、細かい挙動や初期 VOC 組成比と日排出量 VOC 組成の違いなどに関して、現状の再現に課題を残す結果となった。将来的には、現地の VOC 組成の実測データに基づいた初期組成および VOC 日排出量についても組成の新たな検討を用いて、本基本ケースを修正していくことが必要になると考える。

表 52 オキシダント生成能計算の概要

対象地域	汚染域(東京湾、大阪湾)、後背地域(鹿児島市など南九州地域)の 3 箇所
計算対象物質	オゾン濃度(ボックス内の絶対量、同濃度及びケース間の増減分)、NO _x 濃度、VOC 濃度
対象年	平成 14 年 (高濃度オゾン出現年であり陸上排出データが整備されているため) 大気汚染物質濃度の実測データとの合せ込みは、O ₃ 濃度、NO _x 濃度で行う。
気象条件	上記の夏季ならびに春季のオゾン高濃度日を特徴づける代表的な気象条件
気象データ	気温、日射量、混合層高さ(日射量で規定される)
排出量データ	NO _x 及び VOC(汚染域については環境省の使用例で整備したものを用いる。後背地域については汚染域の排出データ・組成を修正し用いる。)
計算プログラム	SAPRC-99

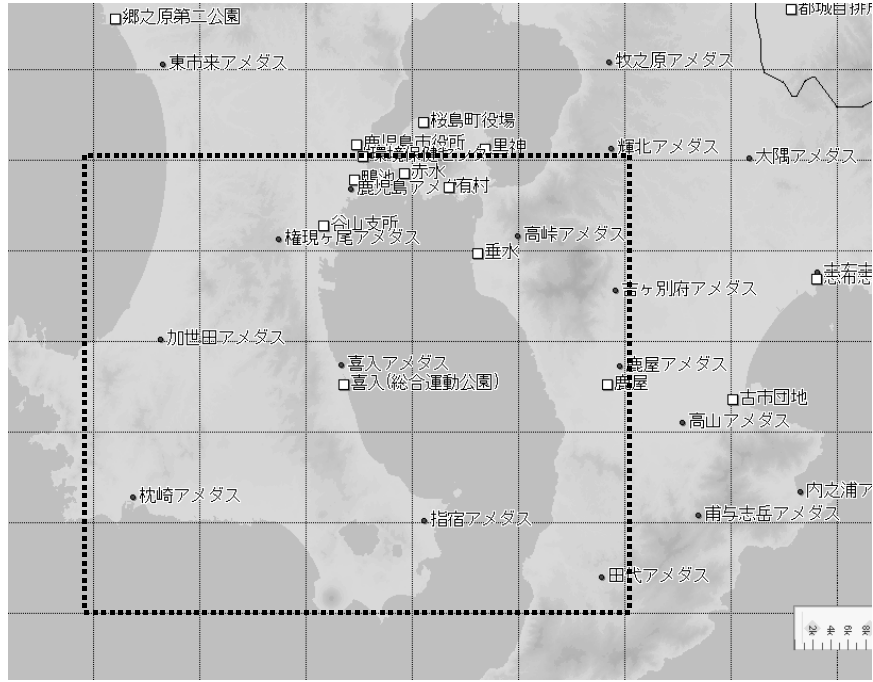


図 67 後背地域(南九州)の計算対象領域
 (地図中口は大気汚染常時監視測定局の位置を示している)

表 53 汚染地域(関東関西)における O₃ 高濃度抽出日

関東春季		関東夏季		関西夏季	
年月日	O ₃ 濃度 (ppb)	年月日	O ₃ 濃度 (ppb)	年月日	O ₃ 濃度 (ppb)
2002/5/14	84.7	2002/7/ 4	131	7/23	90.9
2002/5/19	92.4	2002/7/12	106	7/28	74.3
2002/5/29	83.5	2002/7/31	109	8/3	76.5
2002/5/30	96.7	2002/8/ 7	145		

表 54 後背地域(南九州)における O₃ 高濃度抽出日

春季		夏季	
年月日	O ₃ 濃度 (ppb)	年月日	O ₃ 濃度 (ppb)
2002/4/12	89	2002/7/10	62
2002/4/13	81	2002/8/18	59
2002/5/24	98	2002/8/19	75
2002/5/25	83	2002/8/20	79
2002/5/26	81	2002/8/22	63
2002/5/28	81		

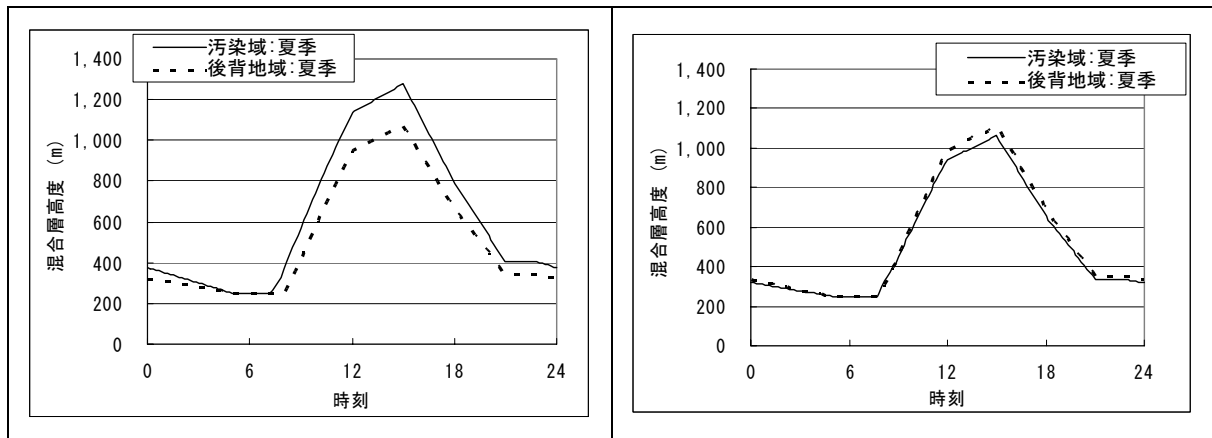


図 68 本事業におけるワンボックスの高さ(混合層高さ)の時間変化

表 55 各計算対象地区における NOx・VOC の初期濃度・排出量

	初期濃度					排出量(g/km ² /日)		
	高濃度の O ₃ 日最高値 (ppm)	O ₃ (ppm)	NMHC (ppmC)	NO _x (ppm)	NMHC/NO _x 比	VOC	NO _x	VOC/NO _x 比
汚染域 関東	0.1162 (0.0857)	0.0196 (0.0100)	0.453 (0.453)	0.0742 (0.0690)	6.11	182,024	99,076	1.84
汚染域 関西	0.0934	0.0144	0.336	0.0463	7.26	305,022	155,567	1.96
後背地域	0.0536	0.0107	0.240	0.0056	42.86	6,839	19,815	0.35

排出量には、両地区とも船舶からの NO_x 排出量が含まれる。

関東の春季計算における日最高値及び初期濃度はカッコ内に示した。カッコ内の数値以外の排出量条件は夏季と同一である。

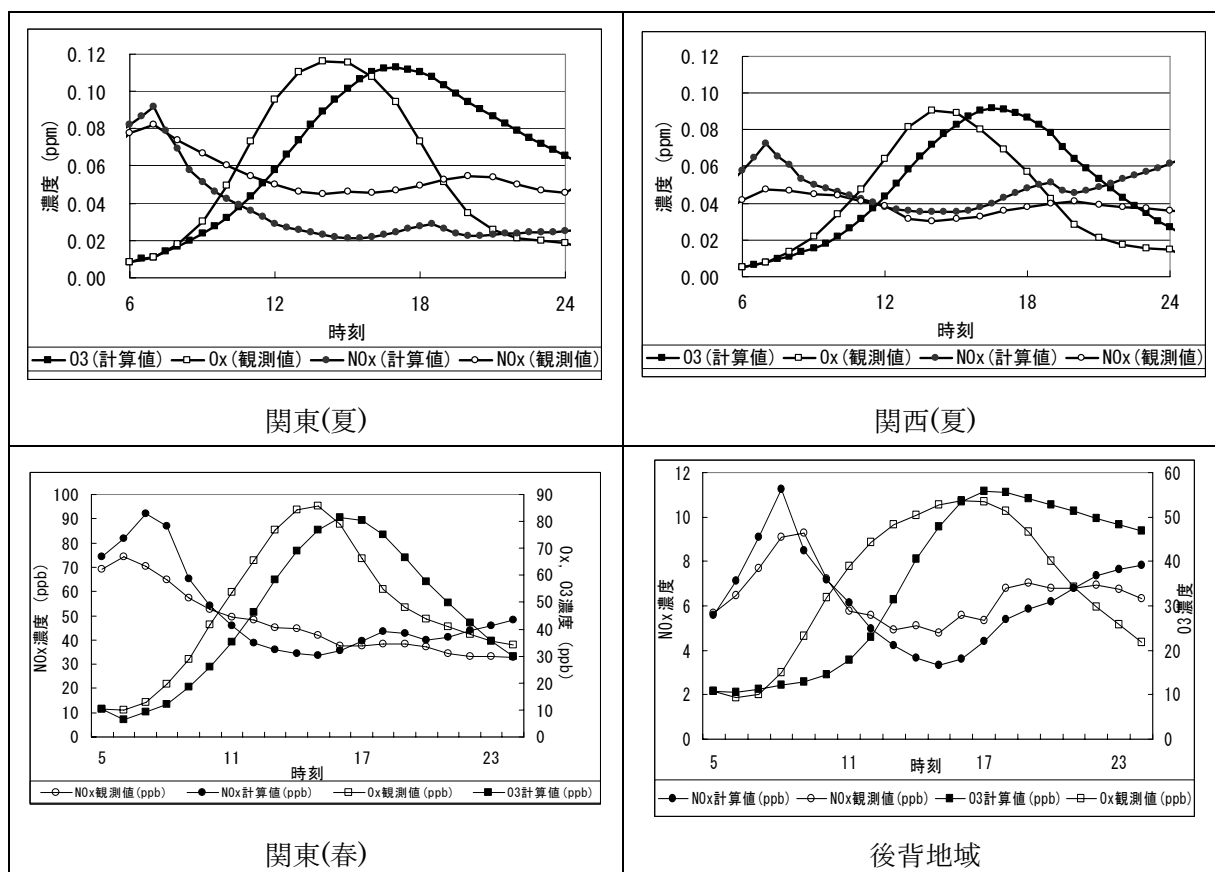


図 69 高オゾン日におけるオゾン及び NOx 観測値と計算値の比較

(b) 船舶から排出される VOC のオキシダント生成能の評価

ここでは、我が国において船舶から排出される主な VOC であるガソリン及び原油の荷役に伴う VOC について、以下の 3 つの方法でオゾン生成能(オゾン最大生成質量/VOC 排出質量)の計算を行い、文献値による生成能(Carter の MIR)と、国内における現実的な環境における生成能との比較を行った。ここで生成能とは、物質としてのオゾン生成力の強さを指しており、環境中において実際にオゾン濃度や存在量をどれだけ増やしているか、といった評価は次節で行う。一般にオゾン生成能が高いと言われるトルエンやキシレンに比較して、船舶から排出される絶対量の多いガソリンと原油の荷役由来 VOC のオゾン生成力の高低を検討すると言え換えられる。3 つの算定方法は以下に示すとおりである(表 56 および表 57 参照)。

- ① Carter の文献より、ガソリン及び原油に伴い発生する VOC の各構成物質について、MIR 値を算定する。同 VOC の構成物質の構成比率に基づき、検索された単体物質の IR を相加平均し、混合物としての MIR を算出。
- ② ガソリン及び原油の荷役に伴う VOC 発生について、VOC の初期濃度、排出量にそれぞれ質量比で 5 %ずつ追加を行った場合の生成能 (IR=オゾン増分/VOC 追加量) を計算。
- ③ 船舶からの排出実態に従い、ガソリン及び原油の荷役に伴う VOC 発生について、VOC の初期濃度、排出量に追加を行った場合の生成能(IR=オゾン増分/VOC 追加量)を計算。

算定方法①と②間の差異は、前者が単体物質としての計算、後者は混合物質としての計算である点である。(1)で述べたように、光合成反応は複数の前駆体が複雑に反応するため、単体物質で計算をした場合と混合物質として追加した場合のオゾン生成能力に差異が出てくる可能性が高い。その差異を検討評価することが、①-②間を比較する目的である。物質ごとの生成能は、米国において Carter が、また我が国においては、環境省が計算しているが、このような複合液体蒸気の生成能を推定することは、世界的に見ても新たな試みである。

また、算定方法②と③間の差異は、前者が全計算時間および初期 VOC 存在量に対してそれぞれ 5 %C の固定追加量を与えているのに対して、後者は現実の排出パターン(増分は約 1.1 wt%)により VOC 追加量を設定したこと、また追加排出量は排出プロファイルに時刻で変化する点である。5 %C という増分は、Carter が生成能の低い物質の評価の際にも、計算プログラムで桁落ちが生じないように、やや大きめの増分を与えているため、ガソリンや原油の荷役に伴う VOC 排出量の比率に比較すると、増分として過大である。また、初期濃度と日排出量に一定の強度で追加を行っているが、夕刻以降の排出分は最大オゾン量が生成される 15 時の量に影響を与えないため、時刻変化についても実態に合わせたケースを比較対象として計算した。

表 56 船舶起源の VOC によるオキシダント生成能の各種計算方法の比較

		ガソリン	原油
a. Carter の MIR (NOx について感度解析を行うが、MIR のみを算定)	単独物質 5%追加時 時間変化なし	c-a	d-a
b. Carter の方法による IR (NOx について感度解析を行い、現実 NOx 比の IR と MIR を算定)	混合物質 5%追加時 時間変化なし	c-a (c の増分が上欄と異なる)	d-a (c の増分が上欄と異なる)
c. 現実 IR (排出実態に即した追加 VOC 割合と VOC 排出時間強度を与えたもの。NOx について感度解析を行い、現実 NOx 比の IR と MIR を算定。)	混合物質 1.1%追加 時間変化あり	汚染域(夏) b-a 汚染域(春) f-e 後背地域 i-g	後背地域 h-g

丸数字は表 57 に示した計算ケース番号を示している。

c-a : 計算ケース c と計算ケース a との差から IR を求めることを示す。

表 57 各計算パターン

	地域		追加物質		計算方法	
	関東	後背地域	ガソリン	原油	現実ケース	IR
a. 汚染域夏・船舶なし	○		なし			
b. 汚染域夏・ガソリン現実	○		○		○	
c. 汚染域夏・ガソリン MIR	○		○			○
d. 汚染域夏・原油 IR	○			○		○
e. 汚染域春・船舶なし	○		なし			
f. 汚染域春・ガソリン現実	○		○		○	
g. 後背地域夏・船舶なし		○	なし			
h. 後背地域夏・原油現実		○		○	○	
i. 後背地域夏・ガソリン現実		○	○		○	

各発生シナリオにおいて荷種の荷役に伴う VOC 発生パターンの違いを示している。

各排出パターンにおいて、NOx 日排出量を、現況排出量に対して 50~200% の範囲で変化をさせ、感度解析を行った。

(c) Carter の MIR 計算結果(個別物質の MIR からの計算値)

図 70 と図 71 に、船舶起源の VOC として代表的なガソリンおよび原油の荷役に伴い発生する VOC の組成を示した。また、表 58 および表 59 にそれぞれの構成物質のオゾン生成能(MIR)を示した。表 56 の①の算定方法による個別物質の最大オゾン生成能(MIR)の算定結果である。

ここで示した組成比は観測された各液体貨物の荷役に伴い発生する VOC の構成比率であり、もとの液体物質の組成比率とは異なる点については留意されたい。すなわち、ガソリンの荷役に伴い発生する VOC の組成比は、本事業においてプロダクトタンカーのベントポストから大気へ排出されたガソリン蒸気が含まれたガスの GC-FID による測定結果から求めた組成比であり、原油の荷役に伴い発生する VOC の組成比は、当財団平成 12 年度調査「船舶からの温室効果ガス(CO₂等)の排出削減に関する調査研究」において、バラスト航海中の原油タンカーのタンク内から採取したガスの GC-FID による測定結果から求めた組成比である。

表 60 及び表 61 に、ガソリンと原油の荷役に伴い発生する VOC の組成比と個別物質の MIR 値から算出される平均 MIR を示した。ガソリンと原油の荷役に伴い発生する VOC を構成する個別物質をみると、原油に体積%で含まれるメタンを除くと、MIR 1 以上の物質がほとんどである。日本においては、メタン(MIR=0.0139)より MIR が大きい物質は、オゾン生成能があると判断され、単体物質として改正大気汚染防止法の規制対象となる。特にガソリンの荷役に伴い発生する VOC には、10 以上の表 51 の表に掲載されたリストの中でも非常に高い MIR を有する cis-2-ブテンなども数%であるが含まれる。

また、個別物質ごとに計算された Carter の MIR の和(質量構成比による加重平均)は、ガソリンでは 1.97、原油では 1.00 と計算された。前者は、主要成分である n-ペンタンの値に、後者はプロパンに大きく影響されているが、この値をみると、それぞれエチレングリコールやシクロヘキサンの MIR 値に類似しており、ガソリンの荷役に伴い発生する VOC は大気汚染防止法において規制対象となっている代表的な溶媒と同程度の平均オゾン生成能を有していることがわかる。

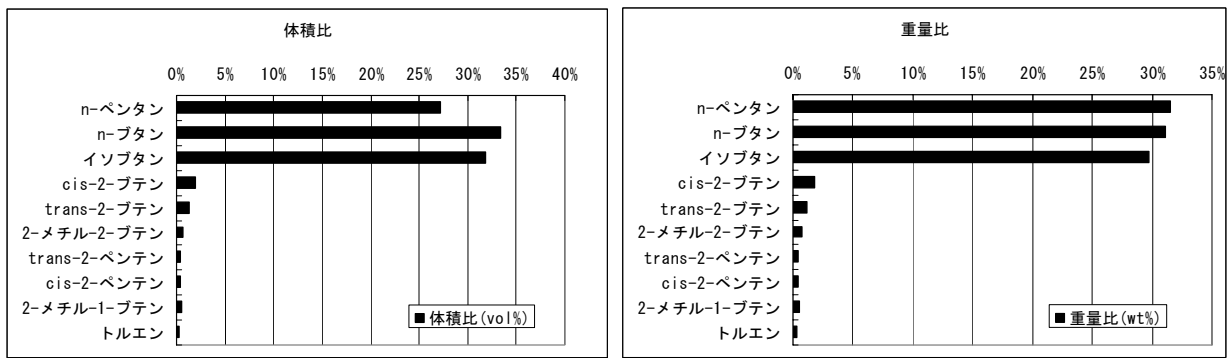


図 70 ガソリン荷役由来 VOC の構成物質
(左が体積比、右が重量比)

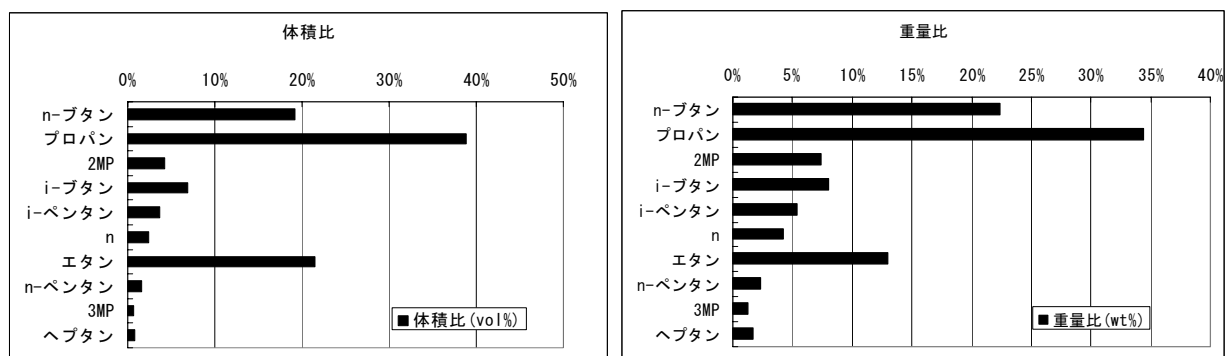


図 71 原油荷役由来 VOC の構成物質
(左が体積比、右が重量比)

表 58 ガソリンの荷役に伴い発生する VOC の化学組成と単独物質としての MIR
(組成物質ごとの表 56 の①の算定方法による計算結果と、VOC 中の組成比)

VOC成分	重量比 wt%	CAS	分類	分子量	体積率 vol%	質量率 wt%	Carter 算定MIR	MIR×質量率 順位
n-ペンタン	11.0 %	109-66-0	C5 Paraffins	72	27.2 %	31.5 %	1.53	1
n-ブタン	25.7 %	106-97-8	C4 Paraffins	58	33.3 %	31.1 %	1.32	2
イソブタン	24.6 %	75-28-5	C4 Paraffins	58	31.9 %	29.7 %	1.34	3
cis-2-ブテン	10.3 %	590-18-1	C4 Olefins	56	2.0 %	1.8 %	13.22	4
trans-2-ブテン	6.7 %	624-64-6	C4 Olefins	56	1.3 %	1.2 %	13.9	5
2-メチル-2-ブテン	3.3 %	513-35-9	C5 Olefins	70	0.7 %	0.8 %	14.44	6
trans-2-ペンテン	1.8 %	646-04-8	C5 Olefins	70	0.4 %	0.4 %	10.23	7
cis-2-ペンテン	1.7 %	627-20-3	C5 Olefins	70	0.4 %	0.4 %	10.23	8
2-メチル-1-ブテン	2.2 %	563-46-2	C5 Olefins	70	0.5 %	0.5 %	6.47	9
トルエン	0.7 %	108-88-3	C7 Aromatics	92	0.2 %	0.3 %	3.97	10
2-メチルペンタン	4.3 %	107-83-5	C6 Paraffins	86	0.2 %	0.3 %	1.78	11

表 59 原油の荷役に伴い発生する VOC の化学組成と単独物質としての MIR
(組成物質ごとの表 56 の①の算定方法による計算結果と、VOC 中の組成比)

VOC 成分	CAS	体積比 vol %	重量比 wt %	Carter の MIR (g/g)	MIR×重 量比	MIR×重 量比順 位	MIR× 重量比 wt %	MIR×重 量比 wt% 累 積	重量比 累積	体積比 累積
n-ブタン	106-97-8	19.2%	22.4%	1.32	0.2955	1	29.5%	29.5%	22.4%	19.2%
プロパン	74-98-6	38.9%	34.4%	0.56	0.1926	2	19.3%	48.8%	56.8%	58.1%
2MP	107-83-5	4.3%	7.4%	1.78	0.1322	3	13.2%	62.0%	64.2%	62.4%
i-ブタン	75-28-5	6.9%	8.0%	1.34	0.1074	4	10.7%	72.7%	72.2%	69.2%
i-ペンタン	78-78-4	3.7%	5.4%	1.67	0.0897	5	9.0%	81.7%	77.6%	73.0%
N	110-54-3	2.4%	4.2%	1.43	0.0603	6	6.0%	87.7%	81.8%	75.4%
エタン	74-84-0	21.5%	12.9%	0.31	0.0401	7	4.0%	91.8%	94.7%	96.8%
n-ペンタン	109-66-0	1.6%	2.3%	1.53	0.0351	8	3.5%	95.3%	97.0%	98.4%
3MP	96-14-0	0.7%	1.3%	2.06	0.0260	9	2.6%	97.9%	98.3%	99.2%
ヘプタン	142-82-5	0.8%	1.7%	1.26	0.0215	10	2.1%	100.0%	100.0%	100.0%
メタン	74-82-8	0.0%	0.0%	0.0139	0.0000	11	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%
合計					1.0003					

原油荷役に伴う VOC には、メタンが 15.6 vol%含まれているが、メタンはオゾン生成能が非常に低く、VOC として扱わないことが多い。このメタンを除外して取り扱った。参考のため、Carter の MIR を記載する。

表 60 ガソリンの荷役に伴い発生する VOC 組成比と
 単独物質ごとの MIR 値から求めた平均 MIR の比較
 (ガソリン荷役に伴う VOC について表 56 の①を計算したもの)

Element	成分名	単独物質のMIR Carter's MIR	VOC重量 比
2M-1-BUT	2-メチル-1-ブテン	6.47	0.5 %
2M-2-BUT	2-メチル-2-ブテン	14.44	0.8 %
2-ME-C3	イソブタン	1.34	29.7 %
2-MEC5	2-メチルペンタン	1.78	0.3 %
C-2-BUTE	cis-2-ブテン	13.22	0.3 %
C-2-PENT	cis-2-ペンテン	10.23	1.8 %
N-C4	n-ブタン	1.32	31.1 %
N-C5	n-ペンタン	1.53	31.5 %
T-2-BUTE	trans-2-ブテン	13.9	1.2 %
T-2-PENT	trans-2-ペンテン	10.23	0.4 %
TOLUENE	トルエン	3.97	0.3 %
加重 平均		1.97	

表 61 原油の荷役に伴い発生する VOC 組成比と
 単独物質ごとの MIR 値から求めた平均 MIR の比較
 (原油荷役に伴う VOC について表 56 の①を計算したもの)

Element	Cas No	分子量	質量率	MIR	質量率 × MIR
N-C4	106-97-8	58.124	0.223866	1.32	0.295504
PROPANE	74-98-6	44.097	0.343875	0.56	0.19257
2-MEC5	107-83-5	86.178	0.074275	1.78	0.13221
2-ME-C3	75-28-5	58.124	0.08015	1.34	0.107401
2-MEC4	78-78-4	72.151	0.053721	1.67	0.089714
N-C6	110-54-3	86.178	0.042156	1.43	0.060283
ETHANE	74-84-0	30.07	0.129399	0.31	0.040114
N-C5	109-66-0	72.151	0.022927	1.53	0.035078
3-MEC5	96-14-0	86.178	0.012598	2.06	0.025952
N-C7	142-82-5	100.205	0.017033	1.26	0.021461
METHANE	74-82-8	16.043	0	0.0139	0
加重 平均					1.000

(d) 混合物質の Carter 法および船舶実態に合わせた VOC 付加時のオゾン濃度計算結果

Carter の方法でガソリンの荷役に伴い発生する VOC を混合物として付加した場合の、関東夏季における O₃ 濃度変化を図 72 に示した。(b)項で説明した表 56 の②と③で示した算定方法による計算結果例である。②の Carter 方式で増加された場合、増分が 5 %ppmC と多いこと、前日夜間の排出量も増分として加えることなどから、オゾン濃度ではおよそ 35%(18 時)、オゾンの存在量では 30%(15 時)と、大きな増加を示している。一方、③の船舶実態に合わせて 1.1 wt% の VOC を負荷した場合は、オゾン存在量で 8.7%程度の増加に留まっている。なお、ここでの計算では、VOC を、日排出量と初期濃度の両者に対して同じ比率で追加している。

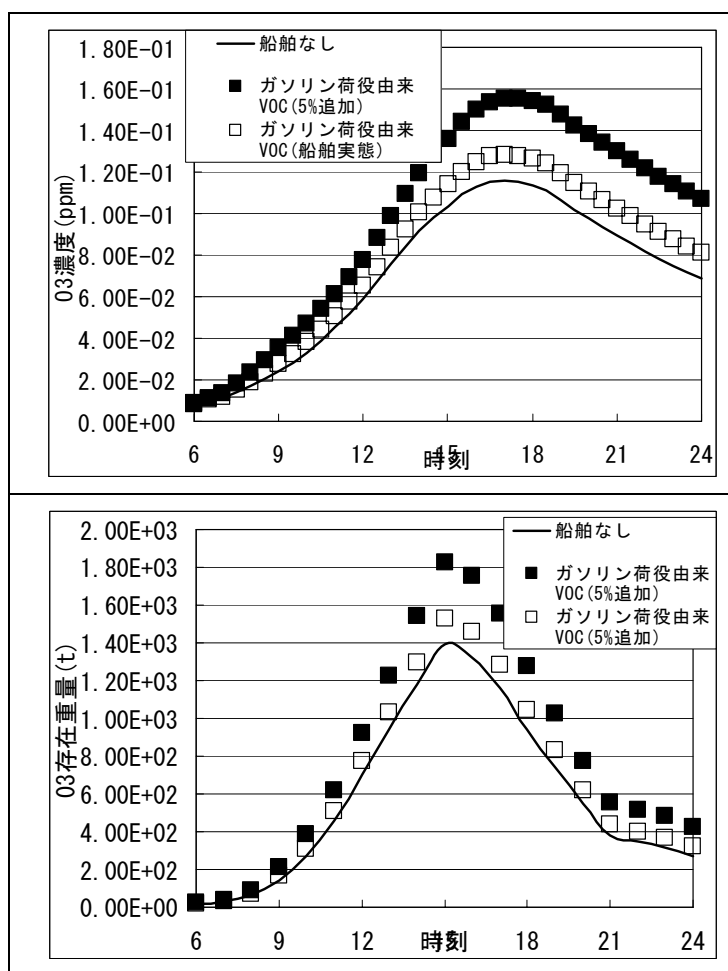


図 72 ガソリンの荷役に伴い発生する VOC を混合物として追加した場合の O₃ の濃度、面密度、存在量の時刻変化 (上図が濃度 ppm、下が存在量トン、■が(b)項で示した②の算定方法、□が③の算定方法)

(e) ガソリンの荷役に伴い発生する VOC の各種算定方法による IR 計算結果の比較

これらの計算結果から、表 56 で示した 3 つの算定方法における計算結果の比較を表 62 および表 63 荷示した。汚染域については表 62、後背地域については表 63 に示しており、NO_x 現況時の IR を現況 IR として、同じく NO_x 排出量を 50～200 %まで変化させた場合の最大 IR の値を、MIR として示している。

(c)項で計算した単独物質での計算結果 1.97 (表 60 の最下欄で計算)と比較すると、②の算定方法で計算される混合物質としてのガソリン由来の VOC が示す最大オゾン生成能 MIR は、関東関西ともに 4.0 前後と、①に比較して 2 倍近く高く計算されることがわかった。

これは、(a) 項で概観したように、単独物質を追加した場合、中間生成物の生成が特定の反応経路に限定されるのに対して、混合物質を追加した場合、複数の中間生成物が同時に光化学反応経路で生じることから、最終生成物であるオゾンの生成速度が速くなることなどに起因していると考えられる。

一方、表 63 に示した後背地域におけるガソリン MIR の絶対値は、汚染域に比較して 1.5 倍程度となっている。NO_x 排出量で正規化(感度解析)されたことと同意となる MIR は、現実の IR とは違い VOC/NO_x 排出比の地域間の差異には基本的には影響されない。地域間による差は、基本ケースにおけるオゾン濃度の低さと、初期の VOC 濃度と組成との違いが影響していると考えられ、今回の場合は後背地の日 VOC、NO_x 排出量が汚染域に比較して非常に低く、また初期オゾン濃度も低いことから、生成されたオゾンが NO_x などにより消費される量が少ないことが影響していると考えられる。

次に、表 56 の②と③で示した算定方法の違いによる IR 数値を、表 62 において比較してみる。両者とも混合物質としての計算を行っているが、その違いは VOC の追加量である。Carter の MIR で設定された増分 5 %C は米国においても仮想的なものである。一方、1.1 wt% の増分は関東における実際の排出量の寄与率に相当し、また全国においてもおよそ 1 %は全国における排出寄与率にほぼ相当している。

表 62 の③は関東で 4.60、関西 4.86 と②の値よりいずれも高く計算され、①の 1.97 の 2.5 倍に近いオゾン生成能を示した。汚染域におけるガソリン荷役に起因する VOC によるオゾン生成能は、表 51 に示した単独物質の MIR に比較すると p-キシレン並であり、オゾン生成能は高い部類に入る。このため、ガソリン荷役に伴う VOC は、排出削減の必要性が高い混合 VOC であると位置づけられる。ただし、規制についての総合的な判断は、物質としてのオゾン生成能力だけでなく、排出量に基づくオゾン量への寄与率や削減コストについて、他の発生源との比較を行った上で行われるべきものである。

他の陸上 VOC 排出源を考えた場合でも、たとえば塗装や印刷においては、トルエン、キシレンなど混合物質が溶媒として使用されることが殆どであり、単一の揮発性物質が実際の排出源から大気中に放出される例は、稀であると考えられる。つまり、業種ごとの VOC 排出量の寄与や削減効果を算定する際には、①の算定方法ではオゾンの削減量が過小評価となる可能性が高い。今後、他の陸上 VOC 排出源の削減効果算定においては、本算定方法②のように混合物質としてのオゾン生成能評価方法の活用が望まれる。

また、①や②の使用されている5% C というVOCの固定追加量は、もともと、オゾン生成能力の低い物質を除外することを想定し、やや多めに設定されている。フロン類などを対象にした計算では5% C 程度のVOC追加量を設定しないと計算内で桁落ちを生じ、生成能が評価できない可能性があるためである。一方、今回のように生成能が高い物質に関して計算を行う場合は、5% C の追加量は過剰である可能性がある。規制対象となっているVOCのオゾン生成能を比較する場合や、削減シナリオなどにおいてオゾン削減量の絶対値を議論する場合には、シミュレーション計算における増分についても現実排出パターンにあわせて再検討する必要があるだろう。

図72を見て解るように、実際に今回の計算についても、汚染域である東京地域においてガソリン荷役由来のVOCに5% C を追加量として計算した場合、オキシダント濃度あるいは最大オゾン存在量の上昇率はおよそ30%であり、同様に後背地域における追加量は35.6%にのぼる。これは、Carterの算定方法では、5% C の増加を日排出量だけでなく、初期濃度に対しても与えていることによっても大きく影響している。初期VOCにこのように反応性の高いVOCを加算していることにより、大きなオキシダント生成量を産出している。実際の大气環境を考えると、前日に仮に5% C のVOCが排出されていたとしても、それがそのまま計算開始時刻である午前5時に全て残っていることは現実的でない。また、初期VOCには夜間のうちに海上などから供給される天然起源のVOCや、他地域からの流入が大きく影響しており、特に後背地においては、その傾向が顕著であろうことは、同地域において計算初期のVOC/NO x 比が汚染域に比較して大きいことでも予想される。このような場合に、初期VOC存在量に対してVOC追加を行うことは、実際の排出パターンと異なる影響、つまりオキシダント生成量を過大に評価している可能性があり、今後の環境影響評価においては再検討すべき点である。

次に、MIRを示すVOC/NO x 比率について考える。オゾン生成能IRを最大ならしめるVOC/NO x 比率は図73に示すように汚染域と後背地域で異なる傾向を示した。汚染域においては、NO x 排出量について感度解析を行った場合、現況NO x 排出量よりも少ないポイントでオゾン生成能が最大となる。つまり、汚染域においては関東、関西地域ともに、現在の状況からNO x 排出量をさらに削減した場合、混合VOCあるいは単独VOC物質のオゾン生成能が高くなり、VOC排出量に変化がなければ予測オキシダント濃度が高くなることになる。「NO x が減ることでO x がむしろ増える場合がある」ことの具体的な例示である。一方、後背地域においては、逆にNO x を現況より増加させた場合、計算上VOC生成能は増加し、オゾン生成量も増加することを図73は示している。

後背地域においては、交通量が都市部に比較して少ないことからNO x 排出量(面強度)は、汚染域の20%程度になっている。他方、VOCは天然起源の排出量があることなどから、実測値においても5時時点のVOC濃度は、汚染域と大差がない。このため、初期の時点でNMHC/VOC比が、汚染域と後背地域において大きく異なっていることが、今回の差異に繋がる大きな原因である。つまり、地域間によってオキシダント生成に関して、NO x 、VOCの削減のバランスを考慮する時期に来ていると考えられる。

次に、関東の春季と夏季の比較を見た場合に、その山の高さが全体に低くなるだけでなく、

MIR を示す NOx 量が更に NOx が少ない領域に移行していることも注目される。

今回の計算においては、日中の VOC・NOx 排出量は、春季においても夏季と同じ量を用いた。実際には、気温の高い夏季においては、蒸発速度・量ともに多くなること、屋外における産業活動も活発であることなどから、陸上 VOC 排出量は春季に比較しておよそ 1 割程度多くなっていると言われている。しかし、船舶からの VOC については、蒸気圧が 20℃から 30℃に変わることから、2 章で見てきたように飽和蒸気圧状態まで達していないため大きな影響はないと考えられる。このため、春季・夏季の違いは、初期の VOC、NOx 濃度(NMHC/NOx 比)、気象条件、O₃ 濃度の初期条件と上空からの O₃ 供給量である。初期の NMHC/NOx 比は、夏季 6.1 に対して春季 6.5、オキシダント初期濃度は夏季 19 ppb に対して春季 10 ppb となっており、これらの初期条件のうち、オキシダントの初期濃度が MIR の絶対値に大きく影響していることが示唆された。

このように、本計算においては、VOC 追加量を一定にした場合の高濃度日のオキシダント生成量は、初期の NMHC/NOx 比に大きく影響されること、汚染域においては NOx 排出量を現況より減らした場合にオゾン生成量が増え、排出量の少ない後背地においては NOx 排出量を増やした場合にオゾン生成量が増えることがわかった。

特に汚染域である大都市圏において「NOx が減ることで Ox がむしろ増える場合がある」という仮説は、2.7.1 項の実測データでもその傾向を紹介したように、環境省の議論においても一般的になりつつある。環境省が今回の VOC に関する大気汚染防止法の改正において第一目標にしているのは光化学オキシダント注意報あるいは警報発令日の減少である。しかし、高濃度日という特殊現象に対する対策において NOx 排出量を減らさないというメニューの提示が、実際の施策において具現化されているとは言えない面もある。

一般的に、NOx 総量の削減は、NOx 自身の環境基準の達成にも直接結びつくことから、それ自身の削減にも十分に意味がある。また、VOC 排出量の削減が、同じく前駆体の減少に繋がりが、全体として環境を改善する方向にあることには間違いはない。つまり、「NOx 排出量と VOC 排出量は双方共に一般的には環境に悪影響を与えるため、両者をバランスよく減らして行くこと」という従来の基本方針あるいは環境行政における一般常識は、総論として賛成すべきであろう。

しかし、オキシダント高濃度日のように特殊な気象条件下におけるオキシダントの生成量を削減する対策メニューとして、「NOx 排出量の削減」だけでなく、「NOx 排出量を減らさない対策」があることを真剣に検討する時期にきていることを、今回の計算結果は示唆している。

例えば「大気汚染防止法の一部を改正する法律の施行について（通知）」¹⁴においても、目的では「、光化学オキシダントについても、工場等の固定発生源からの VOC 排出総量を 3 割程度抑制すれば、光化学オキシダント注意報発令レベルを超えない測定局数の割合は約 9 割まで向上すると見込まれる。」とされている。

同通達の第 13「緊急時の措置」の項目においては、「都道府県知事は、気象状況の影響によ

¹⁴ 平成 17 年 6 月 17 日、環管大発第 050617001 号として、環境省環境管理局长から都道府県知事等あてに通知された文章(http://www.env.go.jp/air/info/taiki_noti/01.pdf)。

り大気の汚染が急激に著しくなり、人の健康等に重大な被害が生ずる場合として政令で定める場合に該当する事態が発生したときは、当該事態が VOC に起因する場合にあっては、VOC 排出者に対し、VOC 濃度の減少、VOC 排出施設の使用の制限その他必要な措置をとるべきこと」を協力要請又は命令ができるとしているが、既存の枠組みとして整備された NOx 排出抑制の協力要請は、「当該ばい煙排出者」として省令第 17 条にそのまま残された状態にある。

少なくとも汚染域において光化学オキシダント影響を抑えるための「緊急時の措置」に関しては、NOx 排出量の制限について柔軟な対応を地方自治体にとらせることも考えられる。つまり、「緊急時においては、光化学反応性のある NOx」のみが抑制できたこれまでの方針を変更し、「NOx の排出抑制より VOC の排出抑制を優先されるように留意する」方向に修正していくことも、検討していく必要があると考える。そのためには、今回実施したような夏季の高濃度日に関する予測を行い、初期濃度の影響や NOx 削減の影響について検討するべきであろう。

表 62 各種算定方法による汚染域におけるガソリンの荷役に伴い発生する VOC のオゾン生成能の比較

対象	汚染域(関東)		汚染域(関西)	
	現況 IR	MIR	現況 IR	MIR
①単独物質 MIR	1.97			
②ガソリン IR(5%追加)	3.85	3.98	3.36	4.04
③船舶実態(1.1 wt%)	4.10	4.60	3.52	4.86

数値は全て夏季

丸数字は、(b)項で説明した表 56 における算定方法と対応する。

表 63 各種算定方法による後背地域におけるガソリンの荷役に伴い発生する VOC のオゾン生成能の比較

対象	後背地域(九州南部)	
	現況 IR	MIR
①単独物質 MIR	1.97	
②ガソリン IR(5%追加)	3.83	5.75
③船舶実態(1.1 wt%)	5.98	6.93

数値は全て夏季

丸数字は、(b)項で説明した表 56 における算定方法と対応する。

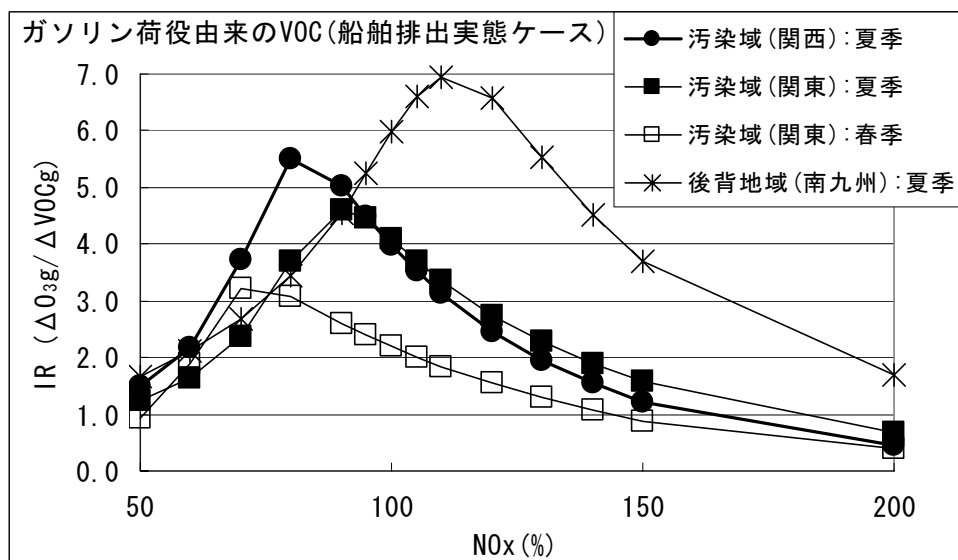
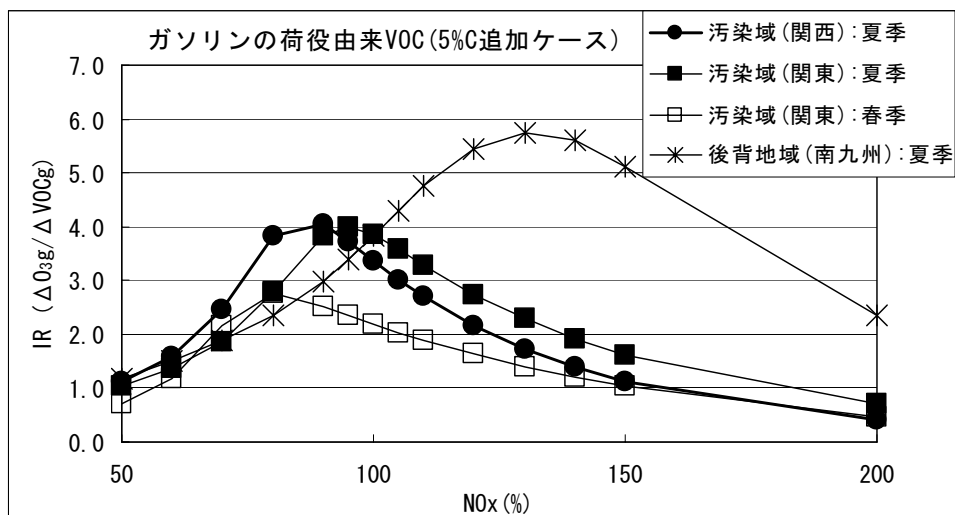


図 73 NOx を変化させた場合の IR の変化(ガソリンの荷役に伴い発生する VOC)
 (上図は、(b)項で説明した表 56 における②の算定方法、下図は③の算定方法)

(f) 原油の荷役に伴い発生する VOC の各種算定方法による IR 計算結果の比較

(e)項で示したガソリンと同じく、表 56 で示した 3 つの算定方法における計算結果の比較を表 64 および表 65 に示した。汚染域については表 64、後背地域については表 65 に示しており、NOx 現況時の IR を現況 IR として、同じく NOx 排出量を現況の 50～200 %まで変化させた場合の最大 IR 値を、MIR として示している。

なお、汚染域における原油荷役(荷積み)は、2.2.2 節で見たように我が国では殆ど行われていないため、③の算定方法は汚染域では実施しなかった。予備計算として、港湾統計の横浜港、川崎港、千葉港で積み込まれる原油量から陸上 VOC に対して 0.02 %の原油荷役起源 VOC の付加を仮定し、計算を行ったが計算中に桁落ちを生じて精度のある結果が得られなかった。

表 64 に示したように、原油の場合、①と②の計算方法によって大きな差異が見られなかった。今回計算した原油荷役起源の VOC が、ガソリン荷役由来の VOC と異なり、一重結合直鎖 HC が多く含まれる混合物であるため、ガソリンと異なる傾向を示していると考えられる。一方、表 65 の後背地域においては、単独 IR のおよそ 1.5 倍程度の値を示した。これが地域間の差異によるものか、ガソリンと原油の違いによるものなのか、今後検討が必要になると考えられた。

表 64 各種算定方法による汚染域における原油の荷役に伴い発生する VOC のオゾン生成能の比較

対象	汚染域(関東)		汚染域(関西)	
	現況 IR	MIR	現況 IR	MIR
①単独物質 MIR	1.00			
②ガソリン IR(5 %追加)	0.82	0.98	0.64	1.00
③船舶実態	-	-	-	-

数値は全て夏季。

丸数字は、(b)項で説明した表 56 における算定方法と対応する。

汚染域における原油荷役(荷積み)は我が国では殆ど行われていないため、③の算定方法は汚染域では実施しなかった。

表 65 各種算定方法による後背地域における原油の荷役に伴い発生する VOC のオゾン生成能の比較

対象	後背地域(九州南部)	
	現況 IR	MIR
①単独物質 MIR	1.00	
②ガソリン IR(5 %追加)	1.59	1.81
③船舶実態(1.1 wt%)	1.81	1.90

数値は全て夏季

丸数字は、(b)項で説明した表 56 における算定方法と対応する。

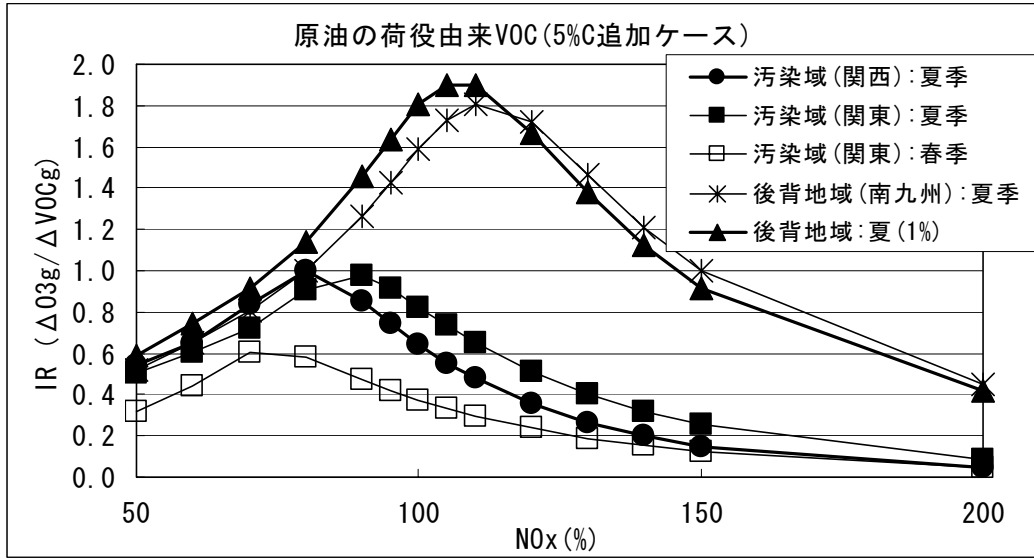


図 74 NOx を変化させた場合の IR の変化(原油の荷役に伴い発生する VOC)
 ((b)項で説明した表 56 における②の算定方法、▲のみ③の算定方法)

(g) 船舶起源 VOC によるオゾン大気環境に対する影響評価

ガソリンの荷役に伴い発生する VOC について図 75 に、VOC 増加絶対量と、O₃ 増加絶対量の関係を示した。計算対象域により、計算領域の広さ、VOC の初期値及び日排出量は大きく異なる。このため、VOC 増加比率の比較ではなく、面積あたり VOC 排出量でみたものである。同地点で二つ点がプロットされているのは、追加 VOC 量の差異による。追加量が多いケースはCarter式の機械的な5 %Cの追加を、追加量が少ないケースは実態に合わせて1.1 wt%を追加したケースである。ガソリンの荷役に伴い発生する VOC の場合、全点はおおよそ一つの直線に乗り、VOC 追加量に対するオキシダント生成能の変化は小さいと考えられた。

汚染域と後背地域のそれぞれで、1.1 wt%のガソリン荷役起源の VOC を付加した場合の O₃ の増加量をみると、汚染域では関東で 0.77 %、関西で 1.43%の O₃ 存在量の増加が見られることが計算された。一方、後背地域においてはモデル計算が一部桁落ちするレベル(参考として 0.15%)であった。

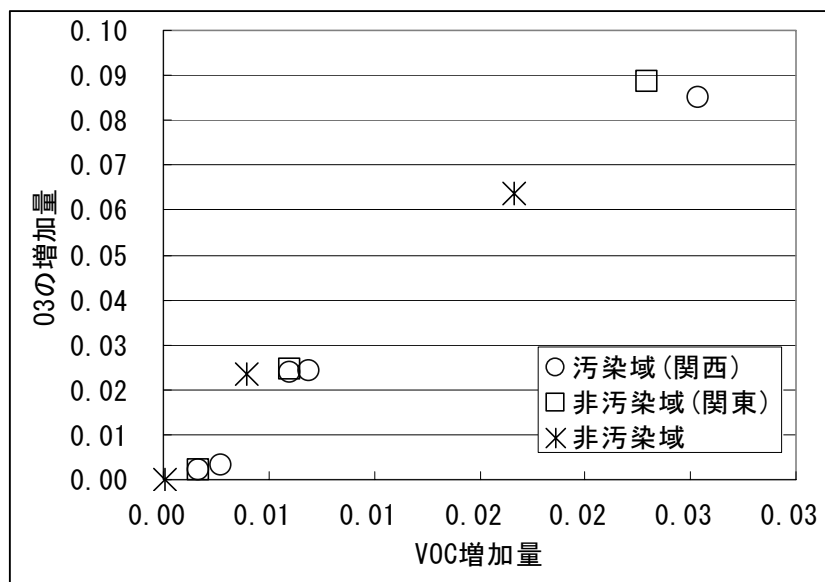


図 75 VOC 増加量と O₃ 増加量の比較(ガソリンの荷役に伴い発生する VOC)

(h) 船舶起源 VOC によるオゾン大気環境に対する影響評価

- 混合物質としてのオゾン生成能は、ガソリンの荷役に伴い発生する VOC においては物質ごとに計算されるオゾン生成能よりも 2 倍近い。一方、原油においてはほぼ同一であった。混合物質のオゾン生成能の算定では、個別物質の相加平均として計算した場合過小評価となる可能性が高く、他の陸上排出源を含めて本評価方法の応用が望ましい。
- 混合物質として計算されるガソリンの荷役に伴い発生する VOC のオゾン生成能は単独物質との比較では p-キシレン並であり、高いオゾン生成能をもつと考えられる。
- MIR としての計算結果は、地域間・季節間の差異が少なく、物質あるいは混合物質に特有の物性値として把握できる傾向にある。これは、米国、環境省の計算例と同じ傾向であった。
- 実際の評価においては、VOC 排出量の時間変化や実際の増加量を十分に考慮した計算を行うことが望ましいと考えられる。
- ガソリンの荷役に伴い発生する VOC を、排出実態(1.1 wt%)にしたがって追加した場合のオゾン生成絶対量は、汚染域の関東において 0.77 %、関西において 1.43 %程度であり、現状では O₃ 濃度を大幅に押し上げるものではないことがわかった。

表 66 各計算ケースにおいて NOx 排出量を変化させた場合のオゾン生成能(IR)の比較

NOx (%)	ガソリン荷役起源の VOC (5%C 追加ケース)			ガソリン荷役起源の VOC (排出実態ケース)			原油荷役起源 (5%C 追加ケース)			原油荷役起源 (仮想ケース)			
	汚染域	汚染域	汚染域	汚染域	汚染域	汚染域	汚染域	汚染域	汚染域	後背地域			
50	1.13	1.03	0.72	1.18	1.50	1.23	0.95	1.67	0.54	0.51	0.32	0.52	0.59
60	1.58	1.37	1.18	1.51	2.19	1.64	1.89	2.12	0.65	0.60	0.44	0.65	0.74
70	2.45	1.87	2.16	1.88	3.74	2.37	3.21	2.67	0.84	0.72	0.60	0.80	0.91
80	3.82	2.79	2.75	2.35	5.51	3.69	3.08	3.43	1.00	0.90	0.58	1.00	1.14
90	4.04	3.84	2.52	2.99	5.01	4.60	2.61	4.54	0.85	0.98	0.47	1.26	1.45
95	3.73	3.98	2.35	3.38	4.48	4.46	2.39	5.24	0.75	0.92	0.42	1.42	1.63
100	3.36	3.85	2.19	3.83	3.97	4.10	2.19	5.98	0.64	0.82	0.38	1.59	1.81
105	3.02	3.58	2.03	4.30	3.52	3.69	2.01	6.59	0.55	0.73	0.33	1.73	1.90
110	2.70	3.28	1.89	4.75	3.13	3.35	1.84	6.93	0.48	0.65	0.30	1.81	1.90
120	2.16	2.73	1.63	5.45	2.46	2.75	1.54	6.58	0.36	0.51	0.24	1.72	1.67
130	1.74	2.29	1.41	5.75	1.95	2.28	1.29	5.54	0.27	0.40	0.19	1.47	1.38
140	1.39	1.92	1.21	5.61	1.54	1.90	1.07	4.52	0.20	0.32	0.15	1.21	1.12
150	1.11	1.62	1.03	5.11	1.22	1.59	0.89	3.70	0.15	0.25	0.12	1.00	0.92
200	0.41	0.71	0.46	2.36	0.45	0.67	0.39	1.69	0.04	0.09	0.04	0.45	0.42
MIR	4.04	3.98	2.75	5.75	5.51	4.60	3.21	6.93	1.00	0.98	0.60	1.81	1.90

汚染域(関東・春季)における計算は、上層のオゾン濃度を 40 ppb としたケースである。

表 67 計算ケースごとのオゾン生成量と VOC 追加量の比較(ガソリン荷役起源の VOC のみ)

	汚染域 (関西)			汚染域 (関東)			後背地域 (九州南部)		
	30km × 40km			70km × 70km			50km × 50km		
	1.1wt%	1.1wt%	5%C	1.1wt%	1.1wt%	5%C	1.1wt%	1.1wt%	5%C
100%	初期あり	初期なし	初期あり	初期あり	初期なし	初期あり	初期なし	初期あり	初期なし
(現況)	6.88E-03	2.73E-03	2.54E-02	6.01E-03	1.64E-03	2.30E-02	3.93E-03	6.14E-05	1.66E-02
⑦△VOC初期存在量 (g/m ²)	4.15E-03	0.00E+00	1.73E-02	4.37E-03	0.00E+00	1.82E-02	3.87E-03	0.00E+00	1.65E-02
⑧△VOC日排出量 (g/m ²)	3.34E-03	3.34E-03	1.53E-02	2.02E-03	2.02E-03	9.10E-03	7.50E-05	7.50E-05	3.46E-04
⑨△VOC5:00~15:00排出量 (g/m ²)	2.73E-03	2.73E-03	8.08E-03	1.64E-03	1.64E-03	4.75E-03	6.14E-05	6.14E-05	1.61E-04
⑩△O3 (g/m ²)	2.42E-02	3.34E-03	8.52E-02	2.46E-02	2.19E-03	8.85E-02	2.35E-02	1.60E-04	6.37E-02
IR (⑩/⑥)	3.52	1.23	3.36	4.10	1.34	3.85	5.98	2.61	3.83
⑫△O3 (g/m ²)	3.34E-02	4.66E-03	1.02E-01	2.77E-02	2.46E-03	9.15E-02	2.72E-02	1.60E-04	9.55E-02
(MIR時)	4.86	1.71	4.04	4.60	1.50	3.98	6.93	2.61	5.75
基本ケース	⑭VOC⑬+⑰ (g/m ²)	6.83E-01		5.78E-01		3.6E-01			
	⑮VOC⑬+⑱ (g/m ²)	5.39E-01		4.92E-01		3.6E-01			
	⑯VOC初期存在量 (g/m ²)	3.78E-01		3.96E-01		3.5E-01			
	⑰VOC日排出量 (g/m ²)	3.05E-01		1.82E-01		6.8E-03			
	⑱VOC5:00~15:00排出量 (g/m ²)	1.62E-01		9.51E-02		3.2E-03			
	⑲O3 (g/m ²) 基本ケース	2.34E-01		2.84E-01		1.1E-01			
⑳O3 (g/m ²) (MIR時) 基本ケース	3.72E-01	3.72E-01	2.96E-01	3.407E-01	3.407E-01	3.114E-01	9.381E-02	9.381E-02	6.806E-02
オゾンの増加率	オゾンの増加率 (IR時) ⑩/⑬	10.34%	1.43%	36.37%	8.67%	31.12%	21.49%	0.15%	58.32%
	オゾンの増加率 (MIR時) ⑫/20	8.98%	1.25%	34.63%	8.12%	29.37%	29.01%	0.17%	140.36%

2.8 削減シナリオ

船舶からの VOC は、航海中、荷役中の二つに分かれ、前者は、15,340 t/年、11,387 t/年と計算される。しかし、前者は、航路帯において、広く低濃度に拡散されること、その成分についても車の高速ディーゼルとの比較で、直鎖系の未燃成分が多い事が期待できることから、現時点において規制の必要性は後者に比較して小さいことが考えられる。ただし、今後船舶排ガスの NOx 規制が進むにつれて、酸素が充分にない状態での燃焼が多くなることも考えられる。EPA の船舶機関に対する排ガス規制においても、TIER2 ではシリンダーあたりの排気量が 30 リットル以上のカテゴリー3 についても、「2007 年 4 月 27 日までに、適用年と NOx+HC、CO のそれぞれについて規制値を公表する」としており、今後の NOx 規制の強化あるいは、使用燃料の変化によっては、HC(排ガス中の未燃 VOC)についても一定の考慮が必要であると考えられる。

次に、荷役中の VOC については、その排出寄与割合が、全ての船舶 VOC で 0.9 %(ガソリン荷役起源の VOC0.5 %、原油で 0.4 %、他のケミカル貨物で 0.05 %)となっており、大気汚染防止法で規制対象になっている接着業とほぼ同じ排出量である。しかし、1.1 wt%のガソリン荷役起源の VOC を付加した場合の O₃ の排出量をみると、汚染域では 2.3 %、後背地域では 0.15%程度の O₃ 量増加が見られることが計算された。同じく、原油についても後背地域において 7.3 %の O₃ 量が増加することが、推定された。これは、夏季の高濃度日において無視できる値ではない。また、春季についても、オゾン生成能が大きく変化しないことから、夏季と同様に一定の寄与があると考えられる。生成能を見ても、p-キシレンと同等の値をガソリン荷役起源の VOC は持っており、全国的に見て、高濃度現象の出現に寄与することが示唆された。

船舶のカーゴタンクから発生する VOC の削減シナリオとして、下表に示すような項目が Norway から MEPC に対して提案されているが、船側の対策は困難である場合が多く、その内容がタンカーカーゴオペレーションに関わる事項および船体強度に関する事項であり、些細なミスで爆発、船体損傷など大事故に繋がる恐れがあり、危険性、必要性、有効性など慎重な検討が必要すべきである。

現時点では、第一段階としては、積荷時における VOC 排出抑制を促進すべきであり、現段階において、積荷時以外への規制適用は時期尚早と思われる。

表 68 タンカー側における VOC 抑制対策一覧

方策	説明	適用時の問題点
貨物の変更	リード蒸気圧の変更など、貨物の蒸散量を少ないものに変更。	ガソリンでは既に実施済み。 原油は原理的に不可能。
貨物の温度	貨物の温度制御(特に夏季においては重要か?)	実測では気温程度であり、冷却には大きなエネルギーが必要。
カーゴタンク内のかく乱状況を制御	船の動揺、タンク内の温度及び密度勾配、貨物の流入速度の脈動、などが大きいと空間内の境界層が破壊され、排出係数が増大する。	今回測定したタンカーではいずれも 50 cm 程度の成層が確認された。原油タンカーのように大規模タンクでは重要か。
カーゴタンク内の圧力制御	0.3 気圧程度高圧力にすると原油で 20 %程度、ガソリンで 10 %程度削減という Norway レポートがある。	荷役時に圧力制御が必要になり、煩雑となる。圧力波の発生など安全性の検討が必要。
カーゴタンク内パイピングの変更	荷積み時においてはサブマージドパイピングなど、荷揚げ時においてはストリップングポンプ及びベルマウスの設置状況など。	後者は現時点でも、回収率の観点から最適化されていると考えられる。サブマージドパイピングは灰圧が極端に高くなり、タンク切り替え時に圧力波が圧送パイプ内に発生することから、陸上側施設の見直しにもつながり、現実的でない。
前荷役時の残留 VOC の除去	前回ガスフリーを行っていない場合は、初期濃度が高くなる。一方、ガスフリー作業そのものによって、大きな排出量が想定される。	ガスフリー作業全体の見直しが必要。同一荷種の場合、爆発限界濃度までの最低限のガスフリーを行うことで、総排出量を抑える方策の検討を行う余地がある。
荷役速度の制御	成層が発達する前に荷役作業が終了する程度まで早く荷役速度を上げれば、排出係数は小さくなるとのレポートあり。	荷役速度をあげることにより、パイプ内に圧力波が発声する可能性が高くなるため適用困難。
タンクの縦横比の変更	体積あたりの表面積が大きいほど、蒸散量が増すため、境界層が成層するまでの時間が少ないと考えられる。	現在のタンク構造は、船体構造強度などの安全面も含めて検討されたものであり、縦横比の変更は困難。

3.まとめ

3.1 船舶起源の VOC 規制の背景

船舶運航に伴う大気汚染物質としては、排ガス中に含まれる NO_x、SO_x、二酸化炭素等ガス状の単体物質がよく知られている。これらのうち NO_x、SO_x の各物質については、国際的には国際海事機関(IMO)が大気汚染防止を目的に定めた MARPOL73/78 条約付属書VIが 2005 年 5 月に発効し、これに合わせて国内においても平成 16 年 4 月「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律(海防法)」が改正され、船舶に対する規制が実施されつつある。また、二酸化炭素については、IMO において削減のための議論が続けられているとともに、環境負荷量に対する報告について荷主からのニーズが高まり、その対応が急がれているところである。

最近では、これら規制済みの大気汚染物質に加え、原油、ガソリン、化学製品類等をタンカーによって輸送する際に大気に排出される揮発性有機化合物(VOC)に関しても、悪臭、発がん性、光化学スモッグ等へ与える影響について懸念する声が大きくなりつつある。VOC は、単体物質である NO_x、SO_x と異なり、揮発性のベンゼン、トルエン、キシレン、ペンタン、ブタン、プロパンなど、様々な化学物質がガス状に混合した複合物質の総称であり、発生機構、発生量、その組成比などは、非常に広範にわたる。陸上の VOC 排出源に対しては、平成 16 年 4 月に改正された大気汚染防止法により一部規制がかけられることになっている。

また、前述の改正海防法においては、現時点では具体的な港湾名や対象船舶は全て未定であるが、将来的に国土交通大臣が VOC 排出を規制するとして指定した港湾においては、VOC を放出する貨物の積み込みが行われる際に、当該船舶に「揮発性物質放出防止設備」の設置使用が義務付けることが可能になっている。また、米国カルフォルニア州、欧州などでは、それぞれ国内法に基づきタンカーへの荷役時における VOC の大気排出が規制されるなど、海外においては具体的な規制例がある。さらに、MARPOL73/78 条約付属書VIの改正作業においても、VOC 規制の具体的な数値の検討作業が含まれている。

このような背景から、我が国においても VOC の排出実態について関心が高まりつつある。しかし、船舶からの VOC 排出については、陸上の VOC 排出源に比較して実態・環境影響ともに十分に解明されているとは言えない。たとえば、排気ガス中の NO_x、SO_x 濃度の測定に比較して、タンカーのカーゴタンクからの VOC 測定は、測定方法が複雑かつ対象濃度範囲が 1,000 倍以上になるため技術的にも困難である。また、安全上の観点から実船測定の実施そのものが難しく、国内における測定例は昭和 50 年以来殆ど実施されてこなかった。また、その環境影響評価についても、NO_x、SO_x に対しては直接の人体毒性リスクなどを根拠に大気環境中で達成すべき濃度目標である環境基準や排出基準が設定されているのに対して、混合物質である VOC のオゾン濃度など大気環境への影響は、他のガス物質濃度やそれ自身の組成に大きく影響され、その機構が複雑であるために、全国一律の基準を持つことが困難である。

3.2 船舶起源の VOC 排出の実態

船舶起源の VOC は、排ガス中に含まれる未燃分と液体貨物の輸送・荷役作業時に発生する蒸散分に分かれる。このうち、蒸発性の高いガソリンや原油の荷役中、中でもこれら貨物を

陸上出荷施設からタンカーに積み出す作業の際に排出される VOC が数量的にも多く、かつ局地的な影響が大きい。

そこで VOC が多く排出されると予測されるガソリンタンカー等の荷積み時の VOC 排出実態を中心に、実船計測及び内航タンカーオペレータに対するアンケート調査を実施し、排出モデルを作成した。測定結果などを解析した結果、ガソリン荷役時(荷積み時)の排出係数は、従来用いられた 0.24 kg-VOC/t-燃料よりはるかに小さく、0.12 kg-VOC/t-燃料程度になると思われる。ただし、海上で行われているガスフリー作業において、荷積み時の排出と同等程度の排出の可能性があるが、今後更に測定例を積み上げて検討する必要があると思われた。揚げ荷時など他の作業に伴う排出量は事実上無視できる。

その結果、航行中には約 15,000 トン/年、ガスフリーを含む荷役中には 11,000 トン/年の排出量があると推定され、これはそれぞれ日本全国の総 VOC 排出量の約 1 wt%、0.9 wt%程度であると計算された。また、地域を限定して見た場合でも、汚染域である関東域におけるガソリン荷役による排出量割合は 1.1 wt%であると推定された。一部の原油備蓄基地や大規模製油所など大量の液体燃料貨物の積み出し施設を有し、かつ地方部に存在する港湾においては、更に高い排出量ベースの寄与率(40 %程度)が計算される可能性もある。しかし、排出量の比較は後背地をどこまで取るかに大きく影響されること、陸上排出の VOC と船舶起源の VOC は組成が大きく異なることなどから、排出量寄与率の比較だけでは大気環境影響として不十分である。このため、3.3 節のシミュレーション計算による環境影響評価を行った。

3.3 船舶起源の VOC の大気環境への影響

最新の光化学反応モデルを組み込んだ VOC 環境影響シミュレーションモデルを開発した。陸上発生源からの VOC 影響が大きい大都市圏などの「汚染域」と、陸上発生源からの VOC は比較的小さい「後背地域」の両方で、船舶への液体燃料の積み出しに起因する VOC の環境影響評価を行った。ガソリン荷役に伴う VOC の反応性は、構成物質の単体の反応性の平均値より高く、エチレングリコール並の高い反応性を示した。

また、実態に合わせたガソリン荷役起源の VOC 排出は、「汚染域」である関東で 0.77 wt%、関西で 1.43 wt%の O₃ の増加量に繋がると計算され、排出量の割合に比例した大気環境影響が予想される。一方、「後背地域」においては大きな影響は見られない結果となった。全体として、各地域ともに、船舶起源の VOC は日最高オキシダント濃度を大幅に上昇させるものではない。

しかし、今後の陸上 VOC 規制の強化に伴い、排出量の寄与割合は 1%前後から大きくなることが予想されること、また都市部の NO_x 規制の強化により VOC/NO_x 比が小さく変化することで、液体貨物由来 VOC の大気中におけるオゾン生成能力が現状より高くなることも予想される。したがって、特に夏季高濃度日など特殊な気象条件においては将来対策を行う必要があると考えられる。その必要性を検討するためには、液体貨物の荷役由来 VOC の影響を定量的に評価することが必要であり、地域ごとのオキシダントや NO_x 存在量及び排出量や流れ込み量が定量的な評価に大きく影響することから、各地域において本事業で当財団が行ったシミュレーション手法などを用いるなど、統一された判断基準で慎重にその影響度合い

を検討評価することが必要になると考えらる。

3.4 船舶起源の VOC 排出を抑制する方策のあり方

船舶起源の VOC は、特に液体貨物の積み出し作業中に発生する。このため、船舶側と陸上側双方の連携が排出抑制のために絶対的に必要である。この点、単独の VOC 排出施設として規制を行い、排出量の管理ができる陸上の固定発生源と大きく異なる。今後、内航船に対しては、海防法に基づき、船舶から VOC が排出される港湾の指定を国が行うことになっているが、陸上発生源に対する VOC 規制の動向も無視できないと考える。

たとえば、同じ液体貨物荷役を行う陸上施設として、ガソリンなどをタンクローリー・タンク車に対して積み出す陸上出荷施設、および一般車への積み込みガソリンスタンドの出荷施設があげられる。現時点では両者ともに大気汚染防止法に基づく規制対象になっていない。

船舶から VOC が排出される港湾に対して海防法に基づき指定する際にも、3.2 で述べた環境面リスク評価を充分に行うとともに、陸上排出源に対する規制、特にタンクローリー・タンク車への陸上積み出し施設に対する規制の必要性とのバランスを考慮するべきと考える。

3.4.1 船舶側の対応

内航のタンカーには、既に多くの船でベイパーの払い出し口を装備していること、ナフサなど一部の貨物の取り扱い作業で、ベイパーリターン作業を経験しているタンカーが多いことから、ガソリンなどの大量輸送貨物の積み出し作業についても、抑制対策を行う実用可能性や汎用性は充分にあると考えられる。ただし、作業手順など安全面の検討は今後、技術指針とともに整備を行う必要がある。

なお、船上に VOC 処理分解装置を設置することを、現在の MARPOL73/78 条約付属書VIは想定していない。「タンカーは、主管庁が承認したベイパー収集装置を装備するもの」とされており、「VOC 排出制御装置」は陸上側に設置される事を想定している。船上への設置は、コスト以外に安全面や運用面からも障害が大きく、陸上施設における一括処理より実現困難であると予想される。

ただし、小規模製油所における払い出し作業において、季節を限定して一時的に処理を行うことや、小型原油タンカーのように専用船化が進んでいる場合は、船上処理及び一次的な処理装置の設置なども将来的には考えられる。今後も、自由度の高い処理技術を引き続き開発することが重要であろう。

また、現在海上においてタンク内を数時間に渡り強制通気するガスフリー作業は、防爆という安全面から必要なものであるが、大気への総排出量が結果的に多くなるという側面があると思われる。今後、安全面と貨物の品質保証に充分配慮しつつ、環境面への負荷及び船員への暴露の観点から作業全体の見直しを、荷主－運航業者間で検討することが望ましい。

外航船については内航船に比較してベイパー収集装置を装備している例が少なく、処理全体の手順書なども未整備である。一部の海外原油積み出し基地においては、回収装置の設置も進められているが、我が国国内の積み出し作業において実施されている例はまだない。我が国において、大型外航船が使用されるのが原油の国内二次移動と一部のケミカル貨物の輸

出であり、これらには不定期船が用いられることが多いことを考えると、国際的な枠組みの中で対策を検討することが好ましい。IMOにおいて、国際的な統一規格の策定と、陸上側の処理施設の規格(排出削減率以外の背圧やガス処理能力など)について技術指針の策定を行う必要があると考えられる。原油や BTX のように蒸気圧が高い貨物については、タンク内圧力の制御範囲を現状より高压側に変更することで、20%程度の VOC 排出削減量に繋がるというレポートもあり、荷役速度の制御あるいは最大載貨量率の変更も含めて、付属書VIの改正作業の中で検討していくことが望ましい。

3.4.2 陸上側の対応

船上で回収された VOC は陸上側の施設で処理することが想定されている。陸上向けの積み出し施設では、国内外の一部の施設において直接燃焼、回収法などを用いた処理施設が存在し、原理的には海上向けの積み出し施設にも適用が可能である。従来は、海外においてはガソリン荷役起源の VOC に対しても、直接燃焼方式の適用が多かったが、今後は回収法で有効利用する方向に推移していこう。ただし、荷役速度の違い、処理装置までのパイピング距離の違いにより、処理施設は大型になり処理コストも割高になることが予想される。

現時点で、VOC 処理装置の性能基準についての議論は行われていないが、陸上での規制と同じく処理コストと削減量のバランスを考慮しつつ、技術指針を定めていくことが必要になると考える。

3.4.3 国に求められる対応

港湾を指定する国は、今後の抑制方策の必要性の判断のため、マクロな排出量の把握とともに、周辺モニタリングポイントで収集可能なオキシダント高濃度、局地的に現象が発生する悪臭問題の発生頻度と影響地域などについて、情報を継続的に収集することが必要である。

3.5 今後の課題

今後の課題については、以下のようにまとめられる。

- VOC のガスフリーの定量的なデータの集積は不十分であり、運航事業者と荷主の協力のもとで、更に実測例を積み上げる必要があると考えられる。
- VOC 規制効果は、地域・季節あるいは増加(削減)量によって影響されることがわかっている。このため、これまで個別に行われていた NO_x 規制と VOC 規制とのバランスを充分慎重に検討する必要がある。そのために、本事業において実施したような、光化学シミュレーション計算を、他の地域あるいは他の業種についても実施する必要があると考えられる。
- 同時に我が国における VOC のオゾン生成能の算定方法については、VOC 増加量、算定対象地域を含めて今後更に詳細に検討する必要があると考えられる。
- 後背地域における初期 VOC 組成についての知見は乏しく、実測値の収集その解析結果の

集約が必要であると考えられた。このために、環境省の高機能モニタリングステーションなどの情報が重要になると予想される。

- モデルとして現在の計算方法は、初期の VOC 濃度、その組成及び O₃ 濃度初期値に大きく左右される。我が国におけるモデル適用の妥当性については、別の日時あるいは計算時間を変更して検討する必要があると考えられた。

用語・略語集

用語	説明
中央環境審議会 (中環審)	環境基本法に基づいて環境省に設置された審議会。環境の保全に関して調査審議等を行う。
環境基本法	環境保護を目的とした法律であり、平成5年に制定された。環境関連の法律の基礎となっている。環境基本計画、環境審議会が規定されている。
大気汚染防止法	大気環境を保全するため、昭和43年に制定された。この法律は、大気汚染に関して、国民の健康を保護するとともに、生活環境を保全することを目的としている。 http://www.env.go.jp/air/osen/law/
VOC	Volatile Organic Compounds;揮発性有機化合物。 揮発性の有機化合物。WHO(世界保健機関)の定義では沸点 260℃以下の有機化合物とされている。VOC 自体が有害大気汚染物質あるいは悪臭物質である場合も多く、同時に、オゾンならびに浮遊粒子状物質の原因物質として問題とされている。
PRTR	Pollutant Release and Transfer Register。日本における法律名は、特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律(平成11年7月13日公布法律第86号)改正平成11年12月22日公布法律第160号(中央省庁等改革関係法施行法)。 人の健康や生態系に有害なおそれがある特定の化学物質について、その環境中への排出量及び廃棄物に含まれて事業所の外に移動する量を事業者が自ら把握して行政庁に報告し、行政庁は事業者からの報告や統計資料等を用いた推計に基づき、排出量・移動量を集計・公表する仕組みである。 特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律により定められている。
SPM	Suspended Particular Matter 浮遊粒子状物質。 浮遊粉じんのうち、直径 10 μm以下の粒子状物質のことをいい、大気中に長時間滞留し、高濃度で肺や気管などに沈着して呼吸器に影響を及ぼす。ボイラーや自動車の排出ガス等から発生する一次粒子と、VOC や NOx、SOx などが大気中の光化学反応により粒子化した二次粒子が含まれる。
FID	水素炎イオン化型分析計(Flame ionization detector)。水素炎中に炭化水素(HC)が導入されると複雑なイオンが生じる。炎をはさんで対向した電極を設け、その間に直流電圧を印可すれば、炭化水素の炭素数に比例した微少なイオン電流が流れるので、これを電圧に変換して測定し、全炭化水素量を測定する。
THC	FID 計においては、原理として VOC 成分ごとの濃度は測定できず、炭化水素の炭素数に比例した濃度として測定される。ケミカルタンカーのように、対象ガスが既知である場合は、分子量と感度係数から、物質濃度に変換することが可能である。単位は ppmC として表される。
ppmC	炭素数換算濃度。大気中の濃度を炭素数で換算したものである。NMHC のように複数物質を対象としている場合に用いる。 体積百万分率濃度におけるベンゼン 1 ppm はベンゼンは1分子中に炭素を6つ含むので、6 ppmC に換算される。
CFR	Code of Federal Register 。米国連邦法をコード化したもの。大気清浄法及び官報などによる政令や修正などが、全て反映されたものになっている。
EPA	Environmental Protection Agency。米国環境保護庁、日本の環境庁に相当する。
NSPS	New Source Performance Standards。アメリカにおいて、1970年の大気浄化法で導入され、新設の発生施設での原料又は生産物の単位当たりの汚染排出許容限度を定めたものである。アメリカでは、環境基準の達成地域か未達成地域かで、適用される排出基準が異なるが、NSPS は全地域で新規排出源に対して適用される最低限の基準であり、NOx、SOx を含めて 1995年から大幅な見直しがなされている。VOC についても連邦レベルにおける規制が初めて導入された。

用語	説明
BAAQMD	Bay Area Air Quality Management District。サンフランシスコ湾岸大気環境管理地区(局)などと訳される。アメリカでは大気浄化法により、連邦全体での管理とともに、大気環境管理地区ごとの管理が行われている。米国で唯一のオキシダント極度汚染地域に指定されていた。このため、BAAQMDでのVOC規制も他の地域に比較して厳しいものとなっている。
SCAQMD	South Coast Air Quality Management District。アメリカ南部沿岸管区大気質管理地区(局)などと訳される。ロサンゼルスを含む、カリフォルニアの南部沿岸地域である。
MACT	最大限実施可能な汚染防止技術。最新あるいは最適の技術を導入した場合に“達成可能な汚染物質の排出基準”の1つ。既存の同じカテゴリーの発生源が採用している技術のうち性能の良い12%の技術の平均をMACT基準とする。
TOC	Total Organic Carbon 総有機炭素。VOCとほぼ同値。米国CFRにおいては、メタンなど光化学反応性のない物質濃度をVOC濃度から差し引いたものとして定義される。
一般大気環境測定局(一般局) 自動車排出ガス測定局(自排局)	大気汚染常時監視測定局には一般環境大気測定局と自動車排出ガス測定局の2種類があり、設置目的で分類される。 一般環境大気測定局は、環境大気の汚染状況を常時監視(24時間測定)する測定局、自動車排出ガス測定局は、自動車排出ガスによる環境大気の汚染状況を常時監視(24時間測定)する測定局である。自排局には設置環境により、沿道局と車道局があり、車道局には環境基準が適用されない。
ベイパーリターン	タンク内に燃料などを積み込む際に発生するVOCを積み込み側のタンク又は処理装置に戻すためのガス配管こと。LNGタンカーの場合は安全上の観点から、ベイパーリターンを含むクローズドサイクルでの荷役が行われる。また、ナフサなど一部の白油タンカーにおいてもベイパーリターン用の配管を用いて発生VOCを陸側に戻すオペレーションが行われる。
OCIMF	石油会社・国際海事評議会。1970年ロンドンで設立。1967年のトリーキャニオン号事故を契機に海洋汚染に対する関心が高まり、石油企業にもその知識経験等につき一定の役割を求められたことから、原油及び石油製品の荷役及びターミナルに関心を持つ石油企業が自主的に集まった。タンカーとタンカーターミナルの安全及び環境に配慮した運用について、第一義的な権威たること、構造要件ならびに運用基準の継続的な改善の促進を目的とする。
ガスフリー	白油タンカーやケミカルタンカーが、液体貨物を揚荷したのち、タンク内ガス濃度が爆発濃度範囲に入らないよう、タンク空間部のガソリン蒸気を排除する作業のこと。上甲板のマンホール蓋を開いてガスフリー用の換気ファンを運転し、タンク底部が乾燥するまで換気を数時間に渡って行う。
S係数	EPAが、タンクからのVOC排出係数算定のために導入した係数。対象物質の飽和蒸気圧×タンク体積(又は荷役体積)で計算される理論上の最大排出量と、実際の排出量の比を取ったもの。
ベントポスト	タンカーの上甲板に設けられた。通常、甲板中央付近に設置され甲板上から5m以上の高さ(タンカーの大きさによる)にフレームアレスター付きの吹き出し口が設けられている。荷役中のタンク内のガスは、全量ベントポストから大気中へ排出されます。周辺区域は防爆指定地域である。
リード蒸気圧	Reid Vapour Pressure。ガソリンなど混合燃料の蒸気圧として利用されるパラメータ。リードの標準方式によって実験室で測定された温度100度F(38℃)における液体の蒸気圧であって平方インチあたりのポンド又は平方センチメートルあたりキログラムの絶対圧力であらわせる。
IPCC(気候変動に関する政府間パネル)	気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change) IPCCは1988年11月、WMO(世界気象機関)とUNEP(国連環境計画)の共催により、地球温暖化問題を初めて政府レベルで検討する場として設立された。世界中の約1,000人の科学者や専門家による地球温暖化の検討を2年間にわたって行い、1990年8月にその成果を第1次報告書「The First Assessment Report」として完成させた。この結果は第45回国連総会や第2回世界気候会議などで報告され、1992年6月のUNCED(国連環境開発会議)においてUNFCCC(国連気候変動枠組み条約)の採択がなされるに至った。1995年12月には第2次報告書「The 1995 Second Assessment Report」が完成している。



この報告書は、競艇交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

平成17年度

船舶からの揮発性有機化合物(VOC)の排出影響に関する調査報告書

平成18年3月発行

発行 海洋政策研究財団 (財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-15-16 海洋船舶ビル

TEL 03-3502-1828 FAX 03-3502-2033

<http://www.sof.or.jp>

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。

ISBN4-88404-150-X