

油濁事故の海洋生態系への影響

—ナホトカ号事故から見て

独立行政法人水産総合研究センター 日本海区水産研究所
日本海海洋環境部 生物生産研究室長 森本晴之

はじめに

1997年1月に隠岐諸島の北北東106km沖で破断したタンカーナホトカ号から約6,240klと大量のC重油が流出し、主船体部は約1万klのC重油が残存したまま、隠岐諸島の北東140km沖の水深2,502mの海底に沈没した。海底の水温は0°C近くと低温であるが、ナホトカ号に積載されたC重油は凝固防止剤が添加され氷点下でも固まらない性状となっていたため、この主船体部からの重油漏出が懸念された。沈没後直ちに無人潜水艇による調査が行われ、実際に重油が漏出していることが確認され、また、航空機による海面油膜の観察によって、主船体部からの漏出量が1日当たり3~14klであることが見積もられ、この漏出の継続期間は約2~9年間と推定された。そして、1997~2002年の5年間に亘る沈没点付近海域における航空機による海面油膜の定期的観察で、実際に重油が漏出し続けたことが確認されている。筆者も事故発生7年以上経過した2004年6月に、沈没点から0.6マイルの範囲に潮流の下流方向に扇状に拡散した油膜を調査船からの目視で観察している。

海洋に流出した鉱油は、拡散、蒸発、溶解、乳濁化、沈降、分解等の過程を経てその性状が変化する。このうち乳濁化の過程は、流出油が波浪などによって海水と混合することによって進行し、最終的に油と海水との混合状態となる。この混合状態（エマルジョン）には水の中に油の粒子が分散してドレッシング状になる水中油型エマルジョンと、油の中に水が分散してムース状になる油中水型エマルジョンの2型がある。水中油型エマルジョン中の油粒子の大きさは非常に小さく、この微粒子はほとんどが微生物分解を受けて消失することが知られている。しかし、その一部は海水に溶解した成分とともに直接的あるいは植物プランクトンによる吸収・吸着を経るなどして間接的に動物プランクトンに移行し、さらにプランクトンの体内に取り込まれたまま魚介類に食べられ、食物連鎖へ組み込まれて行くことも予想される。

筆者の所属する日本海区水産研究所は中央水産研究所及び瀬戸内海区水産研究所と共同で、ナホトカ号事故発生後4年間に亘り、流出油が生態系に及ぼす影響を調べることを目的として、ナホトカ号の船首部及び大量の重油が漂着した福井県三国町における沿岸岩礁域の生物相の回復過程及び生体内残留油成分のモニタリングを行い、また、主船体部の沈没点を中心とした沖合海域においては動物プランクトンの鉱油成分のモニタリングを行った。後者においては、現在もモニタリングを継続している。

沿岸域生態系への影響については、すでに杜多他（2002）及び小山他（2002）が詳しく記述している。ここでは、紙面の都合上、沖合生態系への影響について紹介することとし、日本海の動物プランクトン、特に比較的沖合域を広く分布し、過去に鉱油蓄積の報告事例のなかったオキアミ類を対象として、多環芳香族炭化水素化合物濃度を調べた結果について紹介し、それらの長期モニタリングの重要性について述べる。

また、前段においては、鉱油の水生生物に対する影響についての総説（元廣 1973，緒方・藤澤 1991，山田 2000）を参考に、① 鉱油の水生生物への作用様式，② 鉱油の種類による水生生物への影響の相違，③ 鉱油の各種水生生物への影響濃度の範囲，④ 水生生物による鉱油成分の蓄積と排出，の4点について簡単に紹介する。

1. 鉱油の水生生物に対する影響

① 鉱油の水生生物への作用様式

鉱油の水生生物におよぼす影響には、物理的な影響と生物学的な影響があり、その作用様式は Moore and Dwyer (1974) によって以下の5つの作用にまとめられている。

- 1) 細胞や膜に作用する直接的な致死毒性
- 2) 摂餌行動が異常を示すなど、間接的に死に至る亜致死毒性
- 3) 物理的に生物表面を被覆することによる運動障害及び羽毛や体毛の疎水性を減少させる作用
- 4) 鉱油成分の生物体内へ直接的取り込み、及び食物連鎖による取り込み
- 5) 生息域の物理・化学的な環境変化による生物の種組成や分布状況の変化

特に、水生生物を採集して成り立つ漁業にとっては、作用 1)及び 2)による漁獲物の減少，作用 4)による水産物の食品としての安全性の低下や油臭による価値の低下，また作用 5)による生息環境の悪化（油が海面を覆い，光を遮断することによる植物プランクトンの光合成低下や大気とのガス交換の妨害による溶存酸素低下）による漁場機能の低下など受ける影響は著しく大きい。

② 鉱油の種類による水生生物への影響の相違

鉱油の水生生物に対する作用の仕方は鉱油の種類によって異なる。一般的に分子量の小さい低沸点の炭化水素類は急性毒性的に作用する。特に水溶性画分は有害性が高く，生物の細胞膜を破壊する。甲殻類に対する急性毒性を実験的に調べた例（出子丸他 1976）によると，急性毒性はガソリン>A重油>軽油>灯油>B重油>原油>C重油の順に強く，低沸点成分を多く含有する軽質油は概して毒性が強いとされる。

油は本来疎水性の物質であるが，ごく微量は海水に溶解する。炭素数が少ない成分ほど溶解度が大きく，直鎖の炭化水素に比較して環状炭化水素や芳香族炭化水素は海水に対する溶解度が大きい。例えば炭素数6のそれぞれの炭化水素の例として，ヘキサン，シクロヘキサン，ベンゼンの溶解度はそれぞれ 9.6 mg/l，60.0 mg/l，1，750.0 mg/l と大きく異なる。

水溶性画分の生体膜へ毒性作用は，以下のように説明されている。水中に溶解した成分あるいは拡散した鉱油の微粒子が膜の構成成分であるリン脂質に溶け込み，細胞膜が破壊されてカリウムイオンの溶出がおこる。そして，細胞内の微小器官（ミトコンドリアなど）の膜が破壊され，エネルギーの伝達系が機能しなくなる。油処理剤は，含有する界面活性剤により鉱油成分を生体膜へ取り込みやすくする。

一方，分子量の大きい高沸点の炭化水素類，特に多環芳香族炭化水素類には発ガン性や遺伝子損傷を引き起こす変異原性をもつなど慢性毒性的に作用する化合物がみられる。

これらの物質は分子構造が僅かでも変化すると全く毒性を持たなくなる場合も多いが、生物によって代謝された形となって初めて変異原性もつ間接変異原性あることもニシン仔魚の染色体異常で確認されている (Brown *et. al.* 1996)。

③ 鉱油の各種水生生物への影響濃度の範囲

各種水生生物に対する急性毒性は、生物の種や発育段階の違いによって大きく異なる。可溶性芳香族化合物の各種水生生物に影響を及ぼす濃度は、植物相が 10~100 mg/l, 魚類, 二枚貝 (カキなど) が 5~50 mg/l, 腹足類 (巻貝など) が 1~100 mg/l, 浮遊性甲殻類, 底生性甲殻類 (エビ, カニ), 底生無脊椎動物 (多毛類) が 1~10 mg/l, 幼生 (すべての種) が 0.1~1.0 mg/l と報告されている (Moore and Dwyer 1974)。このように、生物種では概して魚類は貝類に比較して鉱油に対して感受性が高く、また、すべての種において卵や幼生・孵化仔魚など発育段階の初期のものが成体に比較して著しく感受性が高い (緒方・藤澤 1991)。

④ 水生生物による鉱油成分の蓄積と排出

水生生物による鉱油成分の蓄積は以下の 2 つの過程が知られる。1 つは鰓などの呼吸器官を経由して海水中に溶解した鉱油成分あるいは拡散した鉱油微粒子を直接取り込む過程、もう 1 つは餌生物中の有害物質を経口的に取り込み、間接的に体内に蓄積する過程である。後者はいわゆる食物連鎖を通じた蓄積であり、より高次栄養段階生物への移行が危惧される。短期的な油汚染の場合では前者の過程による蓄積が主であり、急性毒性の比較的少ない難分解性の物質による長期間の汚染の場合では後者の過程による蓄積が主である。

魚類や貝類では鰓から取り込んだ鉱油成分の体内からの排出は主に鰓を通して行われ、低沸点化合物は高沸点化合物よりも速く生体内より消失する (緒方・三宅 1979, Ogata and Fujisawa 1985)。多環芳香族化合物など分子量が大きい高沸点成分は生体膜通過が妨げられるため、魚類では肝臓における代謝機能による排出が知られる。魚類は蓄積した多環芳香族化合物を肝臓ミクロゾームに存在する薬物代謝酵素系により代謝する。多環芳香族化合物はチトクローム P450 の作用を受け、ベンゼン環が水酸化した代謝産物として胆汁中に排泄される (Krahn *et al.* 1992)。一方、貝類は、薬物代謝能がほとんど無い、もしくは魚類に比べて著しく低いため、多環芳香族化合物を比較的多く蓄積する (大嶋 2002)。潮間帯など流出油の影響の強い所に生息している貝類は移動能力が低いいため、油濁事故によって有害物質を体内に多く蓄積し易いと考えられ注意を要する。

2. 日本海の動物プランクトンにおける鉱油成分の蓄積例

① 日本海北部・中部のオキアミ類の多環芳香族炭化水素化合物濃度の比較 (森本 2005)

ナホトカ号流出油事故発生から 3 年 3 ヶ月経過した 2000 年 4 月に、日本海北部 (St.3, 21, 23) と中部 (St.6, 8, 10) の 6 定点 (図 1) において採集したオキアミ類の多環芳香族炭化水素化合物 (polycyclic aromatic hydrocarbons ; 以下 PAHs) 濃度を定点別に求め、北部と中部の海域比較を行った。オキアミ類は、採集後直ちにネット採集物からソーティング

し、冷凍保存（ -20°C ）した。PAHs（但し、PAHs 分子量 \geq アセナフチレン分子量）は、試料のアルカリ分解、ヘキサン抽出、カラムによるクリアップ及び濃縮の過程を経た後、ガスクロマトグラフ質量分析計で分析した。

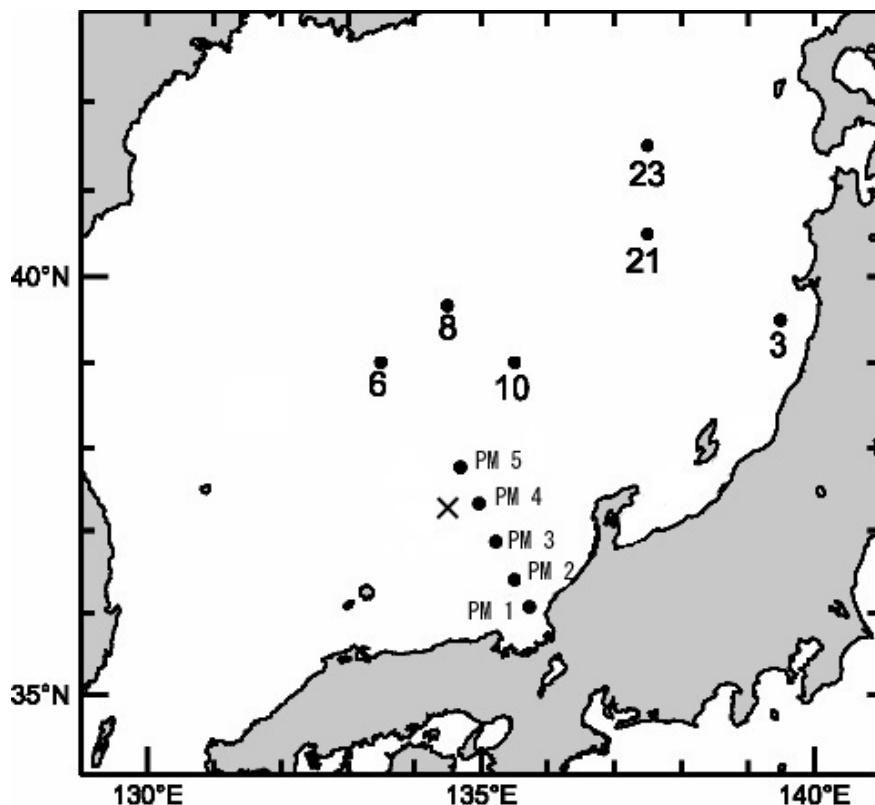


図1 オキアミ類の採集地点

図中の×印はナホトカ号主船体部の沈没地点を示す

日本海の北部と中部海域のそれぞれ3点のオキアミ類から検出されたPAHsの総濃度の平均値(最小-最大)は、それぞれ11.5(9.8 - 13.8), 31.6(23.1 - 45.4) ng/g wetと中部海域が北部海域に比べて有意($P < 0.05$, t -検定)に高かった(図2)。この分析に供したオキアミ類は *Thysanoessa longipes* と *Euphausia pacifica* の2種が混在したが、その割合(湿重量%)が比較的近かった採集点である中部海域(St.6, St.8)と北部海域(St.21, St.23)を比較してもPAHs濃度が前者海域のオキアミ類で有意に高かったことから、オキアミ類におけるPAHs濃度の違いは種組成よりも採集した海域が反映したと考えられた。検出されたPAHs成分は8種でナホトカ号重油の主成分(小山他 1998)であるクリセン、フェナントレン、ピレンが主体であった。

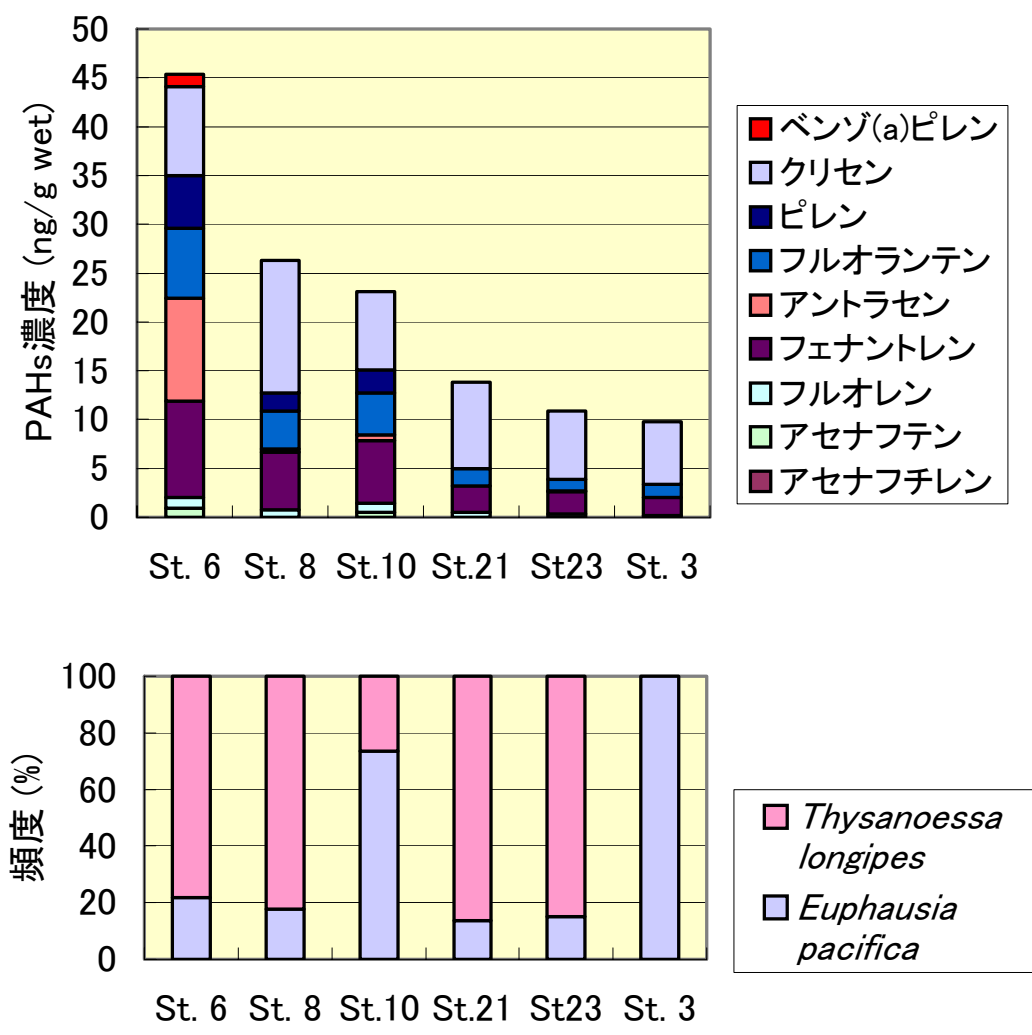


図2 2000年の日本海中・北部におけるオキアミ類の種組成(湿重量%)及び多環芳香族化合物(PAHs)濃度

②福井県三国町沖～沈没点付近海域のツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* における PAHs 濃度 (森本 2005)

福井県三国町沖～沈没点付近海域の5点 (St.PM1～PM5, 図1) において2002年6月に採集したツノナシオキアミのPAHsを前期同様の方法で分析した。

ツノナシオキアミから検出されたPAHsの総濃度は、PM5, PM4と沈没点に近い海域で高かった(図3)。検出されたPAHs成分は9種で、特にナホトカ号重油の主成分であるクリセン、フェナントレン、ピレンがPM5, PM4のツノナシオキアミで多く、これら検出されたPAHs成分がどの程度沈没したナホトカ号主船体からの漏出油に由来するかは不明であるが、沈没点付近の海域が比較的沖合にもかかわらず、産業活動による汚染度が強いと考えられる沿岸域より高かったことから、ナホトカ号からの漏出油の影響が少なくないことが伺える。しかし、現在これら生物への鉱油成分の移行ルートについての確証は得られておらず、今後の研究が待たれる。

なお、この調査研究の一部は、環境省国立機関公害防止等試験研究費（1998～2000年）及び水産庁海洋廃棄物生物影響調査費（2001～2003年）により行った。

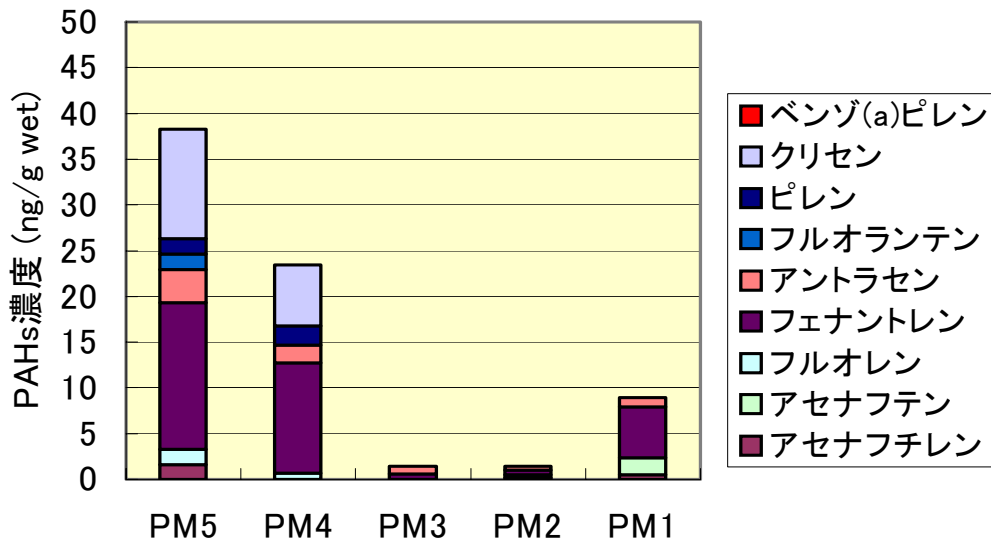


図3 2002年の福井県三国町沖～沈没点付近海域におけるツノナシオキアミの多環芳香族化合物(PAHs)濃度

3. 高次生物への鉱油成分の移行

緒方・藤澤（1991）は、水生生物への鉱油成分の移行と濃縮について、植物プランクトンや動物プランクトンなどの微小生物の濃縮率は極めて高く、鉱油成分のうち急性毒性の比較的少ない難分解性の物質による長期間の汚染の場合は、低次の水生生物へ蓄積して食物連鎖による濃縮が主であると述べている。ナホトカ号事故のように沈没した主船体から長期間に亘り継続して漏出している海域では、この難分解性の物質の高次生物への移行が危惧される。

海水中の油粒子は主にバクテリアによる分解によって消失するとされていることは冒頭でも述べた。しかし、それが分解・消失するまでに、生態系内の食物連鎖の中で動物プランクトンの夜光虫・カイアシ類・ヤムシ類・オキアミ類の体内に取り込まれていることが観察されており、これら動物群以外にも油粒子を取り込むものは多数あると予想される。このことは、生態系の中で動物プランクトンを起点としてより高次生物へと食物連鎖を通して流出油が移行することを示唆し、海洋における流出油の行方に動物プランクトンが重大な役割を果たしていると考えられる。特に、オキアミ類がさば類、いか類や底魚類の重要な餌であること、また、一般的にどの海域においても全動物プランクトンの現存量に占める割合が最も高く、いわし類などプランクトンを餌とする小魚の重要な餌であるカイアシ類が油粒子を積極的に摂取することが知られており（青海 1998）、鉱油成分がより高次生物へ移行することが危惧される。現在、ツノナシオキアミでみた場合、日本海中部海域では幸いその鉱油成分濃度が減少してはいるが（森本 2005）、それら低次生物における鉱油成分量のモニタリングは、今後流出油事故が発生した時の海域汚染度の有効なバック

グラウンド指標値を得る意味から、長期的に継続することが肝要であろう。

引用文献

- Brown, E. D. *et. al.* (1996) Injury of the early life history stages of Pacific herring in Prince William Sound after the *Exxon Valdez* oil spill, *American Fisheries Society Symposium*, 18, 448 - 462.
- 弟子丸修他(1976) 油性物質が水棲生物に及ぼす影響に関する研究, 昭和 50 年度鹿児島県水産試験場事業報告, 調査部編, pp.96 - 124.
- 小山次朗他(1998) 魚介類の流出油成分の残留調査, 「ナホトカ号」重油流出事故に係る水産資源および生態系影響調査中間報告書, ナホトカ号現地連絡協議会, pp.69 - 77.
- 小山次朗他 (2002) 体内残留油成分, 流出油が沿岸・沖合生態系に及ぼす中・長期的影響の解明に関する研究, 平成 12 年度環境保全研究成果集 (環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室編), 環境省, pp.23 - 41 - 23 - 57.
- Krahn, M. M. *et.al.* (1992) Mass spectrometric analysis for aromatic compounds in bile of fish sampled after the *Exxon Valdez* oil spill, *Environ. Sci. Technol.*, 26, 116 - 126.
- Moore, S. F. and R. L. Dwyer(1974) Effect of oil on marine organisms: A critical assessment of published data, *Water Res.* 8, 819 - 827.
- 森本晴之(2005) 沖合低次生物における石油成分の蓄積, 流出油の海洋生態系への影響—ナホトカ号の事例を中心に (大和田紘一・小山次朗・広石伸互編), 水産学シリーズ, 145, 恒星社厚生閣, pp.96 - 108.
- 元廣輝重(1973) 石油の海洋汚染と生物, 水産研究叢書, 24, 日本水産資源保護協会, pp.1 - 82.
- 緒方正名・三宅与志雄(1979) 石油成分の海洋汚染に伴う油臭魚の発生と特にその医学的研究, 環境科学としての海洋学 3, 堀部純男編, 東京大学出版会, pp.222 - 249.
- Ogata, M. and K. Fujisawa (1985) Organic sulfur compounds and polycyclic hydrocarbons transferred to oyster and mussel from petroleum suspension, Identification by gas chromatography and capillary mass chromatography, *Water Res.*, 19, 1, 107 - 118.
- 緒方正名・藤澤邦康(1991) 石油による海洋汚染と環境及び生物モニタリング, 水産研究叢書, 41, 日本水産資源保護協会, pp.1 - 101.
- 大嶋雄治(2002) 薬物代謝酵素活性による重油汚染モニタリング手法の開発, 流出油が沿岸・沖合生態系に及ぼす中・長期的影響の解明に関する研究, 平成 12 年度環境保全研究成果集 (環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室編), 環境省, pp.23 - 57 - 23 - 60.
- 青海忠久(1998) 重油と油処理剤の影響, 重油汚染・明日のために (海洋工学研究所出版部編), 海洋工学研究所出版部, pp.175 - 200.
- 杜多哲他 (2002) 沿岸岩礁域生態系に及ぼす中・長期的影響, 流出油が沿岸・沖合生態系に及ぼす中・長期的影響の解明に関する研究, 平成 12 年度環境保全研究成果集 (環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室編), 環境省, pp.23 - 3 - 23 - 22.
- 山田 久(2000) 流出油の海洋における挙動と水生生物に及ぼす影響, 流出油の海洋生態系に及ぼす影響調査法, 瀬戸内海水産研究所調査研究叢書第 1 号, pp.5 - 18.