

# 油流出事故のサンゴ礁・マングローブ林への環境影響とモニタリング — モーリシャスでの環境回復に向けて

(公財) 笹川平和財団海洋政策研究所 研究員 豊島淳子、中村修子、藤井巖、主任研究員 渡邊敦

## 1. はじめに

本稿は2020年7月25日にモーリシャス共和国（以下、モーリシャス）で貨物船WAKASHIOが座礁、船体損傷し、8月6日より燃料油が流出した事故を受け、その沿岸生態系への環境面での影響および中長期的なモニタリングにおいて考慮すべき点を整理する。座礁地点に隣接するモーリシャスのサンゴ礁やマングローブ生態系の特徴を把握し（2節）、また過去に熱帯沿岸生態系において生じた油流出事故の環境影響を参考にした（3節）上で、モーリシャスの事故や同様の事故が発生した際の短期から中長期的なモニタリングの在り方について整理する（4節）。最後にこれらを基に、モーリシャスのサンゴ礁やマングローブ林の回復へ向けた展望を述べる（5節）。

## 2. モーリシャス共和国の沿岸環境の特徴

モーリシャスは南西インド洋の熱帯域に位置し、国土は主島であるモーリシャス島と数々の島々からなる。最大の面積を持つモーリシャス島は322kmの海岸線を持ち、およそ300km<sup>2</sup>のサンゴ礁やマングローブ林に囲まれている。モーリシャスの環境省が発行しているレポート等によれば、モーリシャスの海洋生物多様性は表1のとおりであり、多種多様な生物が生息している生物多様性の高い海域であると言える。マダガスカル・モーリシャスを含む島々は生物多様性ホットスポットにも指定されている（ただし陸上の植物生態系に基づく分類）。モーリシャスのサンゴ礁は、高水温による白化やサンゴの病気、食害生物の発生等の影響を受けてはいるものの、モニタリングが行われている場所では平均して40%程度の被度が見られる<sup>1</sup>。マングローブに関しては、建築資材を得るための伐採等で過去には減少したが、2007年の漁業海洋資源法によりマングローブが保護種に指定されたことにより、現在では保全や植林等の対策が進み面積は拡大傾向にある<sup>2</sup>。1995年から2011年の間にモーリシャス政府によって13ha以上の土地に22万本のマングローブの苗が植林された<sup>2</sup>。

造礁サンゴ類の多様性に関しては、文献によって異なり、Keesing & Irvine (2005)<sup>3</sup>によれば、モーリシャスの海域で161種が確認されており、未確認の種を含めて294種が生息すると推定されている。また、魚類に関しても、608種のサンゴ礁性魚類、97種の外洋性魚類、8種の固有種、41種の絶滅危惧種を含む953種が生息すると推定されている<sup>4</sup>。ナマコ類はブルーベイ海洋公園内で17種、モーリシャス全体では25種が確認されている<sup>4</sup>。ウミガメ類は主にアオウミガメとタイマイの2種類が見られるが、モーリシャス島の砂浜での産卵行動は確認されていない<sup>5</sup>。海生哺乳

<sup>1</sup> Obura, D., Gudka, M., Rabi, F. A., Gian, S. B., Bijoux, J., Freed, S., ... & Wickel, J. (2017). Coral reef status report for the Western Indian Ocean (2017). In Nairobi convention. Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN)/International Coral Reef Initiative (ICRI).

<sup>2</sup> Ministry of Environment and Sustainable Development of Mauritius. (2011). Mauritius Environment Outlook Report 2011. pp236.

<sup>3</sup> Keesing, J., & Irvine, T. (2005). Coastal biodiversity in the Indian Ocean: The known, the unknown.

<sup>4</sup> Conand, C., Bai, Y. B., Hurbungs, M. D., Koonjul, M., Paupiah, C. N., Mohit, R. D. C., & Quod, J. P. (2016). Distributin of holothurians in the shallow lagoons of two marine parks of Mauritius. SPC Beche-de-mer inf. Bull, 36, 15-19.

<sup>5</sup> Reyne, M., Webster, I., & Huggins, A. (2017). A Preliminary Study on the Sea Turtle Density in Mauritius. Mar. Turt. Newsl, 152, 5-8.

乳類に関しては、モーリシャス周辺でコブハクジラ、ハシナギルカ、マッコウクジラ、ナガスクジラ、ザトウクジラ、マダライルカ、バンドウイルカ、ハナゴンドウ、ユメゴンドウ等多様な種が過去には報告されているが、モーリシャス周辺での分布や個体数に関する詳細な調査は行われていない<sup>6</sup>。ジュゴンも過去には多数生息していたが、乱獲のため今では絶滅したか絶滅に近い状態とみなされている<sup>7</sup>。

表 1：モーリシャスの海洋生物多様性

|                 |  |
|-----------------|--|
| サンゴ             | 16科43属159種の造礁サンゴ類が確認されている。   |
| 魚類              | 340種が確認されている。そのうち、42種の魚が商業的な漁業の対象になっている。   |
| 海藻              | 160属が確認されている。  |
| 海生哺乳類           | イルカ、クジラ、ジュゴン等を含む17種が生息している。  |
| ウミガメ類           | アオウミガメ ( <i>Chelonia mydas</i> ) とタイマイ ( <i>Eretmochelys imbricate</i> ) の2種が頻繁に見られる。                |
| 鳥類 <sup>7</sup> | 28種の固有種を含む155種が生息する。海鳥類は43種が生息する。  |
| マングローブ          | オヒルギ ( <i>Bruguiera gymnorhiza</i> (L.) Lam.,) とオオバヒルギ ( <i>Rhizophora mucronata</i> Lam.) の2種が存在する。 |
| 海草              | 7種が確認されている。  |

出典：Mauritius Environment Outlook Report 2011（ただし鳥類を除く）

モーリシャスは島国であることから漁業も盛んであり、国連食糧農業機関（FAO）によれば、年間の漁獲量は25万t（2017年）で、国民一人当たりの年間消費量は23.2kg（2016年）である<sup>8</sup>。モーリシャスの漁業は大きく分けて、礁池内とそのすぐ外側で行われる小規模漁業、沖合で行われるバンク漁業、外洋で行われるマグロ漁業の3種類がある<sup>9</sup>。魚種としてはマチ類、ブダイ類、フエフキダイ類、ベラ類、ニザダイ類、ハギ類、マグロ類（ビンナガ、キハダ）、カジキ類、タコ、レッドテラピア等多種の魚が漁獲され魚市場等で取引されている<sup>9</sup>。

モーリシャス島周辺には8か所の海洋保護区があり、2か所は海洋公園、6か所は漁業資源保護区域である。2か所の海洋公園のうち、ブルーベイ海洋公園が今回のWAKASHIO座礁地点の近くに存在している（図1）。ブルーベイ海洋公園は、1997年10月に国立公園に指定され、その後2000年6月に海洋保護区に指定された。面積は353haで、保護区内にはサンゴ礁、マングローブ、海草藻場等多様な生態系があり、108種の造礁サンゴ類、233種の魚類、201種の軟体動物等多様な生物が生息する<sup>10</sup>。直径6～7mを超える塊状のサンゴ群体等も見られる。ダイビング、シュノーケリング、グラスボート等による観光利用が盛んである。ブルーベイ海洋公園は、モーリシャス政府によって保護区に指定されているだけでなく、ラムサール条約の登録湿地や、生物多様性条約の下での「生物多様性の観点から重要度の高い海域（EBSA）」にも指定されており、国際的にも価値が認められ保全されている貴重な海域である。

<sup>6</sup> Kiszka, J., Muir, C., Poonian, C., Cox, T. M., Amir, O. A., Bourjea, J., ... & Bristol, N. (2009). Marine mammal bycatch in the southwest Indian Ocean: review and need for a comprehensive status assessment. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 7(2), 119-136.

<sup>7</sup> BirdLife International. (2020). Avibase - Bird Checklists of the World Mauritius. (<https://avibase.bsc-eoc.org/checklist.jsp?region=MU>) (2020年9月10日閲覧)

<sup>8</sup> Food and Agriculture Organization. Fishery and Aquaculture Country Profiles The Republic of Mauritius. <http://www.fao.org/fishery/facp/MUS/en> (2020年9月16日閲覧)

<sup>9</sup> 鹿熊信一郎. (2006). モーリシャスにおける沿岸水産資源・生態系管理の課題と対策. *地域研究*, (2), 223-236.

<sup>10</sup> The Clearing-House Mechanism of the Convention on Biological Diversity. Ecologically or Biologically Significant Areas (EBSAs) Blue Bay Marine Park. <https://chm.cbd.int/database/record?documentID=204016> (2020年9月10日閲覧)

また、海洋保護区ではないがラムサール登録湿地に指定されているポワントデスニー湿地帯も事故発生地点の近くにある。これはマングローブ林や干潟が広がっている22haの浅瀬の汽水域で、森林局によって管理されている<sup>11</sup>。

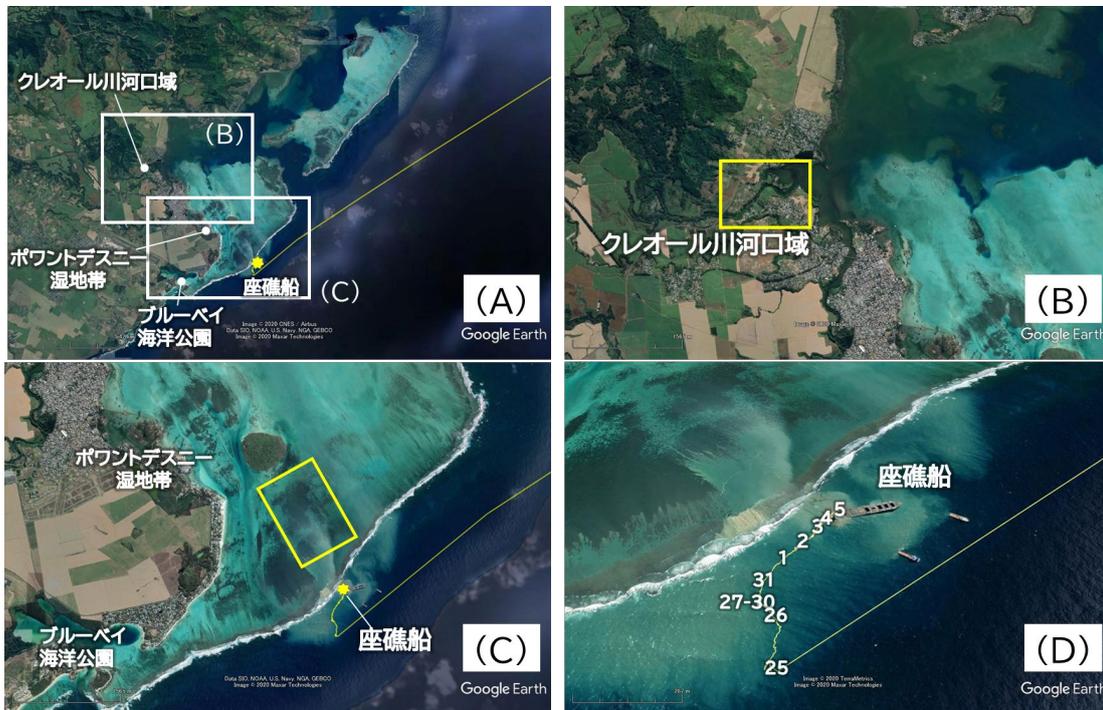


図1. 貨物船WAKASHIO座礁地点。(A) は座礁地点と2つのラムサール条約湿地（ポワントデスニー湿地帯およびブルーベイ海洋公園）、マングローブの被害が大きいと報告のあるクレオール川河口を示す。(B) はクレオール川河口域の拡大図。(C) はポワントデスニー湿地帯周辺の拡大図。(B) と (C) に示す黄色枠はサンゴ礁およびマングローブ林への被害が懸念される大まかな位置を示す。(D) は座礁船を拡大した鳥観図で、数値（日付）は座礁した7月25日～8月5日までの船の位置を示す。(A)、(B)、(D) に示す黄色線はWAKASHIOの船舶自動識別装置（AIS）データに基づく船の軌跡を示す。

### 3. 過去の座礁・油流出事故から考えられる熱帯沿岸生態系への環境影響

WAKASHIOによる座礁・油流出事故と同様、世界的に重要なサンゴ礁やマングローブ海域における船の座礁や油流出事故は過去にも度重なり生じている。2010年以降だけで見ても、2010年4月3日には世界遺産に指定されたオーストラリアのグレートバリアリーフにあるダグラス礁で中国船籍の石炭運搬船・深能1号が座礁し、座礁とその後の船体移動に伴う物理的破壊や船底塗料に使用されているTBT（有機スズ化合物）等によるサンゴ礁への被害が懸念された<sup>12</sup>。2013年1月17日にはユネスコの世界遺産に登録されているフィリピンのトゥバタハ・リーフ（Tubbataha Reef）で、米海軍掃海艦ガーディアンが座礁事故を起こした<sup>13</sup>。同年5月6日も同じトゥバタハ・リーフに中国漁船が座礁する事故が起きている<sup>14</sup> <sup>15</sup>。2019年2月5日には、ソロモン諸島にある世界遺産に登録された

<sup>11</sup> AFPBB News. <https://www.afpbb.com/articles/-/3298920> (2020年9月10日閲覧)

<sup>12</sup> Great Barrier Reef Marine Park Authority. (2011). Grounding of the Shen Neng 1 on Douglas Shoal, April 2010: Impact assessment report.

<sup>13</sup> AFPBB News. <https://www.afpbb.com/articles/-/2922329> (2020年9月10日閲覧)

<sup>14</sup> AFPBB News. <https://www.afpbb.com/articles/-/2942468> (2020年9月10日閲覧)

<sup>15</sup> こうした事故のリスクを減らすために、国際海事機関（IMO）の海洋環境保護委員会（MEPC）は2017年7月にトゥバタハ・リーフを特別敏感海域（PSSA）に指定した。International Maritime Organization. <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/17-MEPC-71.aspx> (2020年10月11日閲覧)

海域で、貨物船ソロモン・トレーダーがサンゴ礁に座礁し、石油が漏出した<sup>16</sup>。

こうした座礁事故およびその後の油流出の影響は、座礁そのものによるサンゴ礁等の物理的破壊、浅海底からの炭酸塩サンゴ砂泥の巻き上げで起こる懸濁影響、海洋生物に及ぼす石油の物理的作用（窒息）と化学的作用（石油の有毒成分等）、また油流出による生態系への間接影響と特にマングローブ林におけるクリーンアップ作業で生じる二次的被害に分けられる。ここでは主に油流出による中長期の生物学的影響を論じる。表2に油流出が個々の海洋生物生息域へ及ぼす影響を分類する。

表2 海洋生物生息域への油流出の影響

| 生息域                           | 対象生物                          | 影響度                                  | 影響   |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| 開放性の海洋                        | プランクトン                        | 影響あり                                 | 油が自然分散、溶解性成分は急速に希釈するが石油毒性により大量斃死<br>食物連鎖に影響の可能性                |
| 沿岸域                           | 海洋哺乳類<br>爬虫類<br>海岸付近の成魚、浅瀬の稚魚 | 油汚染に対し脆弱                             | 呼吸のため浮上、産卵のため上陸し直接暴露<br>食物連鎖を通じて長期蓄積                           |
| 潮間帯・岩礁帯、干潮の際に岩・砂・泥が広範囲に現れる海岸線 | 貝<br>イソギンチャク<br>藻類ほか          | 特に大きい                                | 干潮・低潮時に岩、砂、泥へ油が直接汚染<br>高濃度の暴露となる                               |
| 沼沢地<br>湿地                     | 植物<br>マングローブ<br>土壌            | 大きい<br>汚染レベルによる                      | マングローブ呼吸根を油が覆って塞ぐ<br>塩分バランスを崩して落葉と枯死をもたらす<br>堆積物中に残留し長期に影響を及ぼす |
| サンゴ礁                          | サンゴ<br>サンゴ礁関連動物群<br>海草        | 大きい<br>汚染レベル（有毒成分の割合、暴露期間、他の環境要因）による | 成長阻害、産卵や幼生加入の減少、<br>サンゴ礁の侵食、種多様性減少、<br>サンゴ礁生態系の変化              |
| 海上                            | 海鳥                            | 大きい                                  | 油による羽の損傷に由来する体温低下、溺死、餓死  |

出典：ITOPF<sup>17</sup>、福井県衛生環境研究センター（みどりネット）<sup>18</sup>

油流出の被害については、1986年4月にカリブ海のパナマのバイーア・ラス・ミナス（Bahia Las Minas）で起きた、大規模な油流出事故によるサンゴ礁やマングローブ、海草生態系への影響が、重要なヒントを与えている。同海域では事故発生前よりスミソニアン熱帯研究所（Smithsonian Tropical Research Institute）が実施していた、長期モニタリングプロジェクトのサイトの一部に石油汚染が起きたため、非汚染エリア（コントロール）と汚染エリアの比較、また事故発生前（モニタリングベースライン）と発生後との比較が可能となる条件が揃った。事故発生直後から生態系への影響調査が始まり、同一研究グループによって長期間（30年間）に渡り汚染影響のモニタリングが継続された、数少ない例である。今回のモーリシャスでの油流出（低硫黄C重油、1,000t）と比較すると、パナマでの流出量（原油、8,000t）は量が多く被害も大きいと考えられる。しかし、同じサンゴ礁・マングローブ生態系への影

<sup>16</sup> AFPBB News. <https://www.afpbb.com/articles/-/3214726> (2020年9月10日閲覧)

<sup>17</sup> ITOPF. <https://www.itopf.org/fileadmin/data/Documents/Papers/environ.pdf> (2020年8月17日閲覧)

<sup>18</sup> 福井県衛生環境研究センター（みどりネット）. ナホトカ号重油流出事故について. <http://www.erc.pref.fukui.jp/news/effect.html> (2020年8月17日閲覧)

響を長期追跡した点で、モーリシャス事故での今後の対応に示唆を与えるものとする。パナマ油流出事故の後に報告された環境影響関連論文を時系列に見ながらモニタリングの推移を考察する（表3）。

### 3-1. パナマ油流出事故の関連論文に見る短期・中長期環境影響とモニタリング推移

事故発生からの環境影響モニタリングは、時間スケールとして短期（1年以内）、中期（1-10年）および長期（10年以上）に分類される。生態系の一般的な調査項目としては、生物個体・群数、被度、構成種（多様性）が挙げられる。短期ではまず発生直後の生物影響（生存）確認、2か月後および5か月後の状態が報告された。直後は石油暴露の量と時間の多い場所（低潮位時に干上がる礁原等）で死滅した生物が多く、2か月後には礁原での生物種減少と微小海藻ブルーム (*Laurencia papillosa*) が確認されている。藻類の回復が見られるが、成長の遅いサンゴ・イソギンチャク類・石灰藻の回復は見られない<sup>19 20</sup>。マングローブ (*Rhizophora mangle* L.オオバヒルギ) はその立地（ラグーンやチャネル側、水路、潮間帯・亜潮間帯）や根元の汚染状態により斃死の状況が異なり、支柱根に生息するカキ等の二枚貝やフジツボへの影響も深刻である。生息数が激減し、事故発生から1年以内の回復はない<sup>19 20 21</sup>。またイシサンゴ類は枝サンゴのミドリイシ (*Acropora*) に影響が大きく、塊状サンゴも減少し成長が遅い<sup>22</sup>。短期影響は明確に油流出と関連づけられる。

中期では1.5~2.5年後に外洋に面したエリアの生物には回復が見られるが<sup>20</sup>、イシサンゴ類の群数、被度、種数と多様性、成長サイズは低下のままであり、特に枝サンゴの被度減少が顕著である。またサンゴの劣化は表層からやや深い水深帯（3-6m）まで認められる<sup>22</sup>。藻類と共に石灰藻やイソギンチャクは回復する<sup>20</sup>。マングローブ支柱根の二枚貝類の目に見える回復は1年後にも見られない<sup>21</sup>。この時期までサンゴ (*Siderastrea siderea*) の生殖巣に関する調査が39か月間行われた<sup>23</sup>。汚染リーフでのコロニーサイズおよび生殖巣サイズの減少は、サンゴ群体において生存可能コロニーと生殖体の数を減らすことになる<sup>23</sup>。このようにサンゴへの影響は再生産や初期生活史の段階で特に大きいため、汚濁事故の起きる季節が重要になる<sup>24</sup>。事故から5年経過後にもリーフでは石油と沈殿物の慢性的な汚染に晒されており、サンゴの回復の証拠は得られない<sup>25</sup>。

30年の長期では、汚染エリアのサンゴ礁の被度、種数、多様度は低下のまま回復が見られない。ところが非汚染エリアのサンゴ礁でも、同様に被度や種数が低下していることが確認される。結論として中長期での影響評価は累積的で、流出事故以外の様々なストレス（病気、温暖化の伴うサンゴの白化、土砂流出等）により複雑化する。これらの要因が汚染/非汚染エリア両方で変化を促すために、結局、複合的要因が油流出の影響を隠してしまうと考えられ、長期モニタリングから油流出の影響を評価することを困難にする<sup>26</sup>。

<sup>19</sup> Cubit, J. D., Getter, C. D., Jackson, J. B., Garrity, S. D., Caffey, H. M., Thompson, R. C., ... & Marshall, M. J. (1987, April). An oil spill affecting coral reefs and mangroves on the Caribbean coast of Panama. In International Oil Spill Conference (Vol. 1987, No. 1, pp. 401-406). American Petroleum Institute.

<sup>20</sup> Jackson, J. B., Cubit, J. D., Keller, B. D., Batista, V., Burns, K., Caffey, H. M., ... & Guzman, H. M. (1989). Ecological effects of a major oil spill on Panamanian coastal marine communities. *Science*, 243(4887), 37-44.

<sup>21</sup> Garrity, S. D., & Levings, S. C. (1993). Effects of an oil spill on some organisms living on mangrove (*Rhizophora mangle* L.) roots in low wave-energy habitats in Caribbean Panama. *Marine Environmental Research*, 35(3), 251-271.

<sup>22</sup> Guzmán, H. M., Jackson, J. B., & Weil, E. (1991). Short-term ecological consequences of a major oil spill on Panamanian subtidal reef corals. *Coral reefs*, 10(1), 1-12.

<sup>23</sup> Guzmán, H. M., & Holst, I. (1993). Effects of chronic oil-sediment pollution on the reproduction of the Caribbean reef coral *Siderastrea siderea*. *Marine Pollution Bulletin*, 26(5), 276-282.

<sup>24</sup> Yender, R. A., & Michel, J. M. (Eds.). (2014). Oil spills in coral reefs: Planning & response considerations. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Office of Response and Restoration.

<sup>25</sup> Guzmán, H. M., Burns, K. A., & Jackson, J. B. (1994). Injury, regeneration and growth of Caribbean reef corals after a major oil spill in Panama. *Marine Ecology Progress Series*, 231-241.

<sup>26</sup> Guzman, H. M., Kaiser, S., & Weil, E. (2020). Assessing the long-term effects of a catastrophic oil spill on subtidal coral reef communities off the Caribbean coast of Panama (1985-2017). *Marine Biodiversity*, 50, 1-19.

表3. 1986年パナマ油流出事故の関連論文から見たモニタリング時系列推移

| 経過時間                  | 確認された被害, 影響 (脚注番号)  |
|-----------------------|---|
| <b>事故発生 1986 (4月)</b> |   |
| <b>事故直後</b>           | リーフ基板上生物, 潮間帯マングローブ, 海草海藻, 無脊椎動物死亡 <sup>19 20</sup>   |
| <b>(6月) 2か月後</b>      | リーフ生物種減少, 微小海藻ブルーム増加 <sup>19 20</sup>   |
| <b>(9月) 5か月後</b>      | サンゴ, イソギンチャク類, 石灰藻の発生量低下<br>マングローブの落葉と斃死, 支柱根に生息するカキ等影響深刻 <sup>19 21</sup><br>塊状サンゴ成長低下 <sup>22</sup> , 枝サンゴへの影響大, 塊状サンゴ減少 <sup>26</sup><br>サンゴ骨格, 堆積物, 海水試料中に炭化水素 (石油マーカー) 取込み確認 <sup>27</sup> |
| <b>1987-88 1.5年後</b>  | 浅瀬のサンゴ, 内生動物群集, 海草ベッド大規模斃死 <sup>20</sup><br>外洋に面したエリアの生物回復 <sup>20</sup><br>マングローブ支柱根の二枚貝類は回復なし <sup>21</sup>   |
| <b>1988-89 2.5年後</b>  | サンゴの数, 被度, 構成種数減少, サンゴ劣化は水深3-6mでも確認 <sup>22</sup><br>枝サンゴ (ミドリイシ) の被度減少顕著<br>汚染地点のサンゴ骨格からバナジウム (石油マーカー) 分析 <sup>28</sup>  |
| <b>1991 5年後</b>       | リーフエリアは慢性的に石油と大量の沈殿物に脅かされる <sup>23</sup><br>汚染リーフのサンゴはコロニーと生殖巣のサイズが減少する傾向確認 <sup>23</sup><br>5年後にもサンゴ回復見られない <sup>25</sup>  |
| <b>2017 30年後</b>      | 1985-2017 9回の群体基準値 (被度, 多様性, 構成種, 幼生加入など) 調査結果を比較し回復は見られない, 一方非汚染エリアでも被度や種数の減少 <sup>26</sup>  |

### 3-2. 代替指標を用いた環境影響評価

パナマでは生態系調査と並行して、サンゴ骨格年輪や堆積物といった地質試料を用いて、石油の代替指標 (代用データ、マーカー) である炭化水素や重金属類の分析も行われた。事故の翌年には汚染エリアでサンゴ骨格と組織 (*Siderastrea sidereal*, *Agaricia tenuifolia*)、堆積物、海水試料が採取され、石油マーカーである炭化水素を検出した。脂質・タンパク分析から炭化水素含有量を定量している。またマングローブ周辺の海水からも高濃度で検出され、堆積物に含まれる石油残渣がサンゴ群集に長期間輸送され供給される可能性を示す<sup>27</sup>。別のハマサンゴ年輪 (*Siderastrea sidereal*) からは、重金属元素の石油マーカーであるバナジウムを分析した。この年輪コアは1888~1989の100年分の記録をもち、バナジウムが1962年の精油所操業開始から混入し、沿岸の主要な劣化プロセスが1960年代から始まることを示唆した。これも事故影響評価のベースラインとして貴重な情報を提供する<sup>28</sup>。

地質試料は年縞 (年輪) を持ち、過去の環境記録を復元できるが、いつ採取するのかにより復元範囲が限定される。事故発生から数10年後に採取すれば、事故の影響がいつまで続くかを検証でき、環境モニタリングと同様の役割を果たす。ただし、これは事故や環境変化によりサンゴが死亡することなく、骨格試料を採取できた場合のみ有効である。

生態系のモニタリング結果と、サンゴ骨格や堆積物試料分析から復元した事故前の状況を合わせて見ると、パナマ

<sup>27</sup> Burns, K. A., & Knap, A. H. (1989). The Bahia Las Minas oil spill hydrocarbon uptake by reef building corals. *Marine Pollution Bulletin*, 20(8), 391-398.

<sup>28</sup> Guzman, H. M., & Jarvis, K. E. (1996). Vanadium century record from Caribbean reef corals: a tracer of oil pollution in Panama. *Ambio*, 25(8), 523-526.

のラグーンでは1986年の油流出事故以前、1960年代から既にサンゴ礁生態系劣化が始まっていたことが伺える。事故前のベースラインが決して理想的なサンゴ礁環境ではなかったと考えられることから、事故後の環境回復を目指す場合の基準をどこに設定するのか、ベースラインをもとに検討する必要がある。

### 3-3. マングローブへの油流出による影響

一般にマングローブ呼吸根や胎生種子、堆積物への油の付着や被覆は、マングローブ自体と支柱根に生息する二枚貝等の生物の呼吸を困難にさせ、油の毒性により悪影響を与える<sup>21-29</sup>。また塩分バランスを崩してマングローブの落葉と枯死をもたらす。堆積物中に残留する油は数年間も海中にしみ出して隣接するサンゴ礁域に運ばれる可能性もあり、長期に生態系に影響を及ぼし得る<sup>21-29</sup>。油の除去は至急で行われる必要があるが、クリーンアップの為に人がマングローブ湿地に踏み込むことが、根や苗木の破壊や、堆積物中に油濁を広げることに繋がり、影響を長期化させる懸念もある<sup>30</sup>。

1986年の事故は4月（乾季）に発生した。パナマにおける年間降水量は3200mmを越えるが、乾季の降水量は非常に低い（2～3月が最低、4月の月間降水量約100mm）。また潮位変動幅は62cmであるが、3～4月の平均潮位は最低となる。年間に最も干上がる季節に、漂着した油がマングローブ湿地の根やカニの巣穴に入り込み、堆積物の汚染（鉛直方向へ石油暴露）は深刻さを増す。その後10～11月に最大降水量（600mm/月）と最高潮位を迎え、水位上昇が再び周辺環境に汚染を広げる。パナマでは1968年12月にも大きな事故が発生しているが、マングローブ林への影響は発生時の季節によっても影響が異なることを示唆する<sup>29</sup>。

### 3-4. 魚類への油流出による影響

サンゴ礁海域の魚類への影響に関しては、沿岸域で直接油に晒されることにより致死するほか、2010年メキシコ湾海底の大規模油流出事故では、事故前後にフエダイ（red snapper）の食餌が変化したとの報告がある<sup>31</sup>。食餌は魚のサイズで異なるものの、動物プランクトンを主体とする魚サイズの食餌が事故翌年にかけて、食物連鎖のより高次の生物や遠洋性動物プランクトンに変化した。石油毒性の影響で動物プランクトンの発生量が減少し、食物連鎖を通して生態系への影響が現れることを示している。

## 4. 環境影響のモニタリングとそれに基づく環境回復の在り方

### 4-1. 環境モニタリングの実施

船舶の座礁・油流出事故後における環境モニタリングは、事故が周辺の海洋生態系やひいては水産業や観光業を通じ地域社会に与え得る影響を評価するうえで、必要不可欠である<sup>24</sup>。特に、WAKASHIOの座礁・油流出は、サンゴ礁やマングローブ林を含む多様で複雑かつ貴重な生態系が存在する沿岸域で発生した（2節）。事故後のモニタリングでは、多層的な影響評価が求められる。本節では、サンゴ礁やマングローブ林を含む熱帯浅海域で類似の座礁・油流出事故が発生した場合に、どのような環境モニタリングが必要とされるかを、3節での環境への影響を踏

<sup>29</sup> Duke, N. C., Pinzón M, Z. S., & Prada T, M. C. (1997). Large-Scale Damage to Mangrove Forests Following Two Large Oil Spills in Panama 1. *Biotropica*, 29(1), 2-14.

<sup>30</sup> Hoff, R. Z. (2002). Oil spills in mangroves: planning & response considerations. National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA Ocean Service, Office of Response and Restoration.

<sup>31</sup> Tarnecki, J. H., & Patterson III, W. F. (2015). Changes in red snapper diet and trophic ecology following the Deepwater Horizon oil spill. *Marine and Coastal Fisheries*, 7(1), 135-147.

まえたうえで概観する。

第一に、船体の乗揚げおよび撤去作業による環境への影響（座礁による影響）および油流出による環境への影響（油濁による影響）を調査する必要がある（表4）。第二に、油濁による影響を評価する際は、サンゴやマングロープ等生態系そのものへの影響、および水中の濁度や土壌等周辺環境への影響（環境要因）を調査する必要がある（表4）<sup>32 33</sup>。第三に、生態系への影響を評価する際は、生物の増減等、生態系のマクロな変化の観察に加え（生物の増減）、生体内の変化や体内に取り込まれた汚染の影響等、生態系のミクロな変化を観察する必要がある（生体内の変化）（表4）<sup>34 35</sup>。また、油濁による産卵への影響等、生物の生活史を包含する形でモニタリングを実施することが重要である<sup>36</sup>。さらに、サンゴ礁やマングローブ林等の生態系における相互作用や連結性を鑑み、沿岸域一体の包括的なモニタリングが求められる<sup>37</sup>。

表4. 船舶の座礁・油流出事故後における多層的環境モニタリングの概念

|         |        | サンゴ礁               | マングローブ林     |
|---------|--------|--------------------|-------------|
| 想定される被害 |        | 座礁による損壊<br>油濁による汚染 | 油濁による汚染     |
| 指標      | 生物の増減  | 被度                 | 枯損木の割合      |
|         | 生体内の変化 | 骨格中の汚染物            | クロロフィル光合成能力 |
|         | 環境要因   | 水中の濁度              | 土壌中の汚染物/分解菌 |

環境モニタリングは包括的であることに加え、短期・中期・長期にわたり事故の影響を調査すること、および座礁・油流出事故前の海洋生態系の状態（ベースライン）を把握することが必須である。モーリシャスに派遣された日本の国際緊急援助隊の報告によると、調査を実施した8月上旬時点で、事故発生地近辺に位置するラムサール条約登録サイトであるブルーベイ海洋公園およびポワントデスニー湿地帯のサンゴやマングローブへの直接的な影響は観察されなかった<sup>38</sup>。しかし、座礁地点付近で破壊されたサンゴ礁からの微細な炭酸塩と思われるものによる濁りが生じたり（図 1 C,D）、クレオール川河口域を中心にマングローブ林で油による汚染が報告されている（図 1 A,B）。サンゴ礁やマングローブ林、それらを取巻く生物や生態系には、短期・中期・長期で異なる影響があることを第3節で触れた（表3）。したがって、異なる時間スケールで事故による環境の変化を捉えていくことが重要である。それに加え、本

<sup>32</sup> International Petroleum Industry Environmental Conservation Association. (1992). Biological impacts of oil pollution: coral reefs. V. 3.

<sup>33</sup> Machado, L. F., de Assis Leite, D. C., da Costa Rachid, C. T. C., Paes, J. E., Martins, E. F., Peixoto, R. S., & Rosado, A. S. (2019). Tracking mangrove oil bioremediation approaches and bacterial diversity at different depths in an in situ mesocosms system. *Frontiers in microbiology*, 10, 2107.

<sup>34</sup> Reinert, F., de Pinho, C. F., & Ferreira, M. A. (2016). Diagnosing the level of stress on a mangrove species (*Laguncularia racemosa*) contaminated with oil: A necessary step for monitoring mangrove ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1-2), 94-99.

<sup>35</sup> Nakamura, N., Kayanne, H., Takahashi, Y., Sunamura, M., Hosoi, G., & Yamano, H. (2020). Anthropogenic Anoxic History of the tuvalu Atoll Recorded as Annual Black Bands in coral. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.

<sup>36</sup> Johansen, J. L., Allan, B. J., Rummer, J. L., & Esbaugh, A. J. (2017). Oil exposure disrupts early life-history stages of coral reef fishes via behavioural impairments. *Nature ecology & evolution*, 1(8), 1146-1152.

<sup>37</sup> Unsworth, R. K., De León, P. S., Garrard, S. L., Jompa, J., Smith, D. J., & Bell, J. J. (2008). High connectivity of Indo-Pacific seagrass fish assemblages with mangrove and coral reef habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 353, 213-224.

<sup>38</sup> 国際協力機構. <https://www.facebook.com/jicapr/posts/3190684090967716> (2020年9月18日閲覧)

来の生態系を把握するためのベースライン情報を得る必要がある<sup>39</sup>。事故による影響を受けた生態系については、影響を受けていない生態系を有する沿岸域を対照区とし、長期にわたる比較が求められる<sup>40</sup>。対照区やベースライン情報は、事故による環境への影響を測定する際の、また、環境回復を考える上での基準となることから、モニタリングの重要な要素である。

#### 4-2. 環境モニタリング方法

環境モニタリングには様々な手法があるとともに、その指標も多岐にわたる。本稿では、はじめにサンゴ礁とマングローブ林のモニタリングを例に、その方法について説明する。

サンゴ礁のモニタリングについては、その被度（調査地点におけるサンゴが占める割合）が主な指標として用いられる。その計測方法には、主にトランセクト法とコドラート法が用いられる<sup>41</sup>。トランセクト法とは、海底に設置したラインに沿って、異なる海底基質（サンゴ、海草、砂地等）の有無や割合を観察する手法である。一方でコドラート法とは、海底に設置した正方形の枠内における海底基質の有無や割合を観察する手法である。長期モニタリングでは、トランセクトとコドラートを定位置に固定する場合と、無作為に設置する場合がある。さらに、トランセクトに沿ってコドラートを等間隔または無作為に設置する、組合せの方法も用いられる。記録には、耐水紙を用いた手書きによる方法の他、カメラやビデオによる方法も用いられる。トランセクト法は一直線上に観察を行うことから、サンゴの被度を比較的短時間に推定できる。そのため、より広い範囲の被度を把握するうえで有効である<sup>42</sup>。一方でコドラート法は枠内全体の海底基質を記録していくことから、データの取得に時間を要する。しかし、トランセクト法と比較しても、稚サンゴの加入状況等のより詳細かつ正確なデータを得ることが可能である<sup>43</sup>。いずれの方法を用いる場合も、サンゴの成長速度や水温上昇等のストレス耐性は、その形状に左右されることを考慮する必要がある。例えば枝状のミドリイシ科のサンゴは物理的損傷を受けやすく、ストレス耐性に弱い<sup>44</sup>。一方、塊状の種が多いハマサンゴ科のサンゴは物理的損傷を受けにくく、ストレス耐性に強い。したがって、サンゴの被度を指標にする際は、その形状ごとにデータを取る必要がある。

マングローブ林のモニタリングについては、様々な計測項目が設けられる。例えばトランセクト法を用いて、調査地点におけるマングローブの位置、種、状態の記録、あるいは、コドラート法を用いて、マングローブの種や状態を記録するとともに、樹高、胸高直径、密度の計測等が実施される<sup>45</sup>。また、立地環境によってマングローブの回復率に差が出ることから、地形や標高等を同時に記録する必要がある。例えば、外洋に面したマングローブは油濁による影響を受けやすい一方、マングローブ林内側のマングローブでは汚染の影響がより長く残るため、その回復が遅い<sup>46</sup>。現地調査に加え、その複雑な構造から立ち入ることが困難なマングローブ林においては、衛星撮影やドローン撮影等、リモートセンシング技術を用いて、広域な範囲におけるマングローブ林の状態を把握することも有効である<sup>47</sup>。その多くは紫外線や可

<sup>39</sup> Smith, J. E., Brainard, R., Carter, A., Grillo, S., Edwards, C., Harris, J., ... & Vroom, P. S. (2016). Re-evaluating the health of coral reef communities: baselines and evidence for human impacts across the central Pacific. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1822), 20151985.

<sup>40</sup> Hill, J. J., & Wilkinson, C. C. (2004). *Methods for ecological monitoring of coral reefs: a resource for managers*. Australian Institute of Marine Science (AIMS).

<sup>41</sup> English, S. S., Wilkinson, C. C., & Baker, V. V. (1997). *Survey manual for tropical marine resources*. Australian Institute of Marine Science.

<sup>42</sup> Done, T., Roelfsema, C., Harvey, A., Schuller, L., Hill, J., Schläppy, M. L., ... & Loder, J. (2017). Reliability and utility of citizen science reef monitoring data collected by Reef Check Australia, 2002–2015. *Marine Pollution Bulletin*, 117(1-2), 148-155.

<sup>43</sup> Leujak, W., & Ormond, R. F. G. (2007). Comparative accuracy and efficiency of six coral community survey methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 351(1-2), 168-187.

<sup>44</sup> Manzello, D. P. (2010). Coral growth with thermal stress and ocean acidification: lessons from the eastern tropical Pacific. *Coral reefs*, 29(3), 749-758.

<sup>45</sup> Ellison, J. (2012). *Manual for mangrove monitoring in the Pacific Islands Region*.

<sup>46</sup> Duke, N. C. (2016). Oil spill impacts on mangroves: recommendations for operational planning and action based on a global review. *Marine Pollution Bulletin*, 109(2), 700-715.

<sup>47</sup> Adamu, B., Tansey, K., & Ogutu, B. (2018). Remote sensing for detection and monitoring of vegetation affected by oil spills. *International*

視光線、赤外線を含む電磁波を利用したスペクトル画像、電磁波のうちマイクロ波のみを利用した合成開口レーダーによる画像が用いられる。これらの画像を用いて、植生の分布状況が植生指標として推定される。

現地調査を伴うモニタリングでは、サンゴやマングローブの増減に影響を与え得る環境要因（例：水温、気温、水中濁度、土壌塩分）を記録することも重要である。また、モニタリングにおいて求められるデータの質、また、調査する地点における人員や予算、海況等を鑑み、適切な方法が選択されるべきである。

#### 4-3. 船舶座礁・油流出事故後の環境モニタリング

##### 4-3-1. 座礁による影響のモニタリング

船舶の座礁・油流出事故では、座礁および油濁それぞれに伴う環境への影響を調査する必要があることは、上記で述べた通りである。はじめに座礁による環境への影響についてだが、こちらはサンゴの被度が主な指標となる。また、サンゴ礁は事故後に物理的な破壊を受けることから、サンゴの損壊等の短期的な影響から、その後の回復状況等の中長期的な影響を観察する必要がある。モーリシャス沿岸の衛星画像から、WAKASHIOはサンゴ礁のアウトリーフと呼ばれる礁斜面・礁縁部に座礁したことが見て取れる（図1）。この部分はサンゴ礁と外洋の境目のことを指し、サンゴ礁の内側である「インナーリーフ」と同様に高い生物多様性を誇る海域である<sup>48</sup>。また、防波堤の役割を果たし、沿岸域一体を外洋の波浪から保護する役割を果たす<sup>49</sup>。船体の乗揚げおよび撤去作業に伴うサンゴ礁の損壊は、その機能を低下させる一因となる恐れがある。また、今回の事故では、アウトリーフの座礁地点から白い濁りのようなものが、インナーリーフに広がっていることが確認される（図1 C,D）。これは、破壊されたサンゴ礁から発生した炭酸塩が拡散したものである。微細な粒子が水中の濁度を上昇させてしまう場合、サンゴ中の褐虫藻が十分な光を得られず、その光合成機能が低下する<sup>50</sup>。また、これらがサンゴを堆積として覆った場合にも、同様の現象が生じる<sup>51</sup>。座礁による影響を評価する際は、損壊したサンゴの状況が調査されるとともに、サンゴの被度の経年変化を長期的に観察する必要がある。同時に、濁度や堆積物の状況を把握し、その変化を記録する必要がある。

##### 4-3-2. 油濁による影響のモニタリング

###### (1) 生態系のマクロな視点から（生物の増減）

次に油濁による環境への影響についてだが、サンゴの被度やマングローブの枯損木が占める面積等、それらの分布状況を示す指標を用いて、生態系への影響をマクロな変化から観察することが求められる。また、短期的にはサンゴの成長速度の低下やマングローブの落葉と斃死、中長期的にはサンゴの被度の減少やマングローブ林における汚染物の沈殿、それによるマングローブへのさらなる影響の恐れがある（表3）。したがって、タイムスパンによって生態系の異なる変化を注視する必要がある。

WAKASHIOは、2020年1月から国際海事機関が定めた低硫黄C重油（硫黄分が0.5%以下）を燃料油として搭載しており、今回は当該重油が流出した初の事故となる<sup>52</sup>。低硫黄C重油は硫黄分が少ないため動粘度が低く、

Journal of Remote Sensing, 39(11), 3628-3645.

<sup>48</sup> Cadoret, L., Adjerdou, M., & Tsuchiya, M. (1999). Spatial distribution of chaetodontid fish in coral reefs of the Ryukyu Islands, southern Japan. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 79(4), 725-735.

<sup>49</sup> Frihy, O. E., El Ganaini, M. A., El Sayed, W. R., & Iskander, M. M. (2004). The role of fringing coral reef in beach protection of Hurghada, Gulf of Suez, Red Sea of Egypt. Ecological Engineering, 22(1), 17-25.

<sup>50</sup> Jones, R., Giofre, N., Luter, H. M., Neoh, T. L., Fisher, R., & Duckworth, A. (2020). Responses of corals to chronic turbidity. Scientific reports, 10(1), 1-13.

<sup>51</sup> Flores, F., Hoogenboom, M. O., Smith, L. D., Cooper, T. F., Abrego, D., & Negri, A. P. (2012). Chronic exposure of corals to fine sediments: lethal and sub-lethal impacts. PloS one, 7(5), e37795.

<sup>52</sup> 日本海事新聞。【インタビュー モーリシャス座礁】。 <https://www.jmd.co.jp/article.php?no=259981> (2020年9月18日閲覧)

流動点（油が凝固する直前の温度）が高い<sup>52</sup>。今回の事故で海に流出した重油は約1,000tと、その他の油流出事故と比較して流出量が少なく<sup>53</sup>、その被害は小規模とされている<sup>38</sup>。また、油濁による顕著な水中の濁度の上昇は報告されていない。しかし、このような性質を持つ重油が生物に与える影響は未知数である。油流出事故が発生した際、多くの場合、浮遊油や水中油が事故発生地周辺の海域に滞留する<sup>32</sup>。その影響を明らかにすべく、サンゴの被度の経年変化をモニタリングする必要がある。マングローブ林についても、マングローブの支柱根・呼吸根への重油の付着が確認されているが、このような場合、周辺の地中に流れ着いた重油が長期間残留する可能性がある<sup>46</sup>。したがって、重油の特性や拡散した範囲を詳細に明らかにしたうえで、マングローブ林における枯損木が占める面積を長期的にモニタリングする必要がある。また、マングローブ林に残った油が流出し、周辺のサンゴ礁に長期的な影響を与える可能性も考えられることから、モニタリングに際しては2つの生態系が相互に及ぼす影響について流動場等に留意する必要がある<sup>19</sup>。

## （2）生態系のミクロな視点から（生体内の変化）

油濁による環境への影響をモニタリングする際は、生物の体内の変化や体内に蓄積される汚染の変化を調査することも検討されるべきである。マングローブ林については、葉のクロロフィルによる光合成活性を観察することによって、油濁がこれらに与える影響を計測することが可能である<sup>34</sup>。マングローブでは汚染を受けた直後に落葉等の変化が生じることから、クロロフィルの観察は短期の影響を調査するうえで有効な指標となる。サンゴ礁については、サンゴの骨格に取り込まれる、年輪の痕跡として残る油由来の汚染物質を観察することによって、油流出事故による長期的な影響を観察することが可能である<sup>35</sup>。サンゴの骨格を用いた影響評価では、ベースライン情報が乏しい際に、サンゴが影響を受ける前の状態を推定することが可能である。また、長期モニタリングを実施する場合、生物に付着した油の影響とともに、海水温の上昇やそれに伴う白化現象、海洋酸性化等のその他の外的要因が相互に作用し、生体に複雑な影響をもたらす<sup>54 55</sup>。したがって、長期モニタリングでは油濁による影響のみを抽出して生物の変化を観察することが難しくなる。そのため生物の体内の変化は、長期にわたる生態系への影響を把握したい際に、特に有効な指標となる。

## （3）生態系全体を俯瞰したモニタリング

油流出事故後の環境モニタリングでは、魚類や貝類を含む、サンゴ礁やマングローブ林を取巻く生物への短期的な影響を考慮するとともに、それら生物の生活史を加味した中長期的なモニタリングも重要である。短期的な影響については、マングローブ根に生息する貝類の斃死が報告されている<sup>19</sup>。中長期的な影響では、例えばサンゴについては、重油の汚染がその生殖巣のサイズの減少を引き起こし、繁殖能力の低下をもたらす恐れがある<sup>56</sup>。マングローブについては、油濁後の土壌汚染により、クロロフィルが欠損した胎生種子が発生することが報告されている<sup>57</sup>。このような胎生種子は成長せずに枯れてしまうことから、マングローブ林の減少を引き起こす。魚類については、汚染の影響を受けた

<sup>53</sup> 日本経済新聞。重油1000トン超流出 モーリシャスの環境・生態系に影響。 <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO62482600Z00C20A8NN1000/> (2020年9月18日閲覧)

<sup>54</sup> Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., ... & Bridge, T. C. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373-377.

<sup>55</sup> Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W., & Dove, S. (2017). Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification. *Frontiers in Marine Science*, 4, 158.

<sup>56</sup> Hartmann, A. C., Sandin, S. A., Chamberland, V. F., Marhaver, K. L., de Goeij, J. M., & Vermeij, M. J. (2015). Crude oil contamination interrupts settlement of coral larvae after direct exposure ends. *Marine Ecology Progress Series*, 536, 163-173.

<sup>57</sup> Duke, N. C., & Watkinson, A. J. (2002). Chlorophyll-deficient propagules of *Avicennia marina* and apparent longer term deterioration of mangrove fitness in oil-polluted sediments. *Marine pollution bulletin*, 44(11), 1269-1276.

仔魚（孵化直後の個体）の死亡率の上昇や、成長率の低下が報告されている<sup>36</sup>。これら魚介類は水産資源として人々の重要な食料となることから、その影響を併せて評価することは、地元の漁業等の産業に与える影響を図るうえでの基礎情報となる。モーリシャスのブルーエコノミー海洋資源水産海運省の発表によると、ポワントデスニー湿地帯を含む複数の地点から採取された魚体から、重油由来の炭化水素または多環芳香族炭化水素が検出された<sup>58</sup>。そのため同省は、油流出事故が発生した北側沿岸一帯の漁業を一時的に禁止する措置を決定した。汚染を受けた生物に関してはその資源量が減少する可能性があるとともに、それにより生態系のバランスに影響を与える可能性がある<sup>59</sup>。さらに、多くの種がそれらの生活史においてサンゴ礁、マングローブ林の両方を生息地としている<sup>37</sup>。したがって、油流出事故後のモニタリングは、生態系全体を俯瞰した実施が必要となる。

#### （４）周辺環境のモニタリング（特にマングローブ林における環境要因）

油流出事故が発生した場合には、生態系への影響を調査するとともに、周辺環境のモニタリングが求められる。サンゴ礁の場合、上述の通り座礁による影響を評価する際と同様に、水中の濁度の変化をモニタリングする必要がある<sup>24</sup>。マングローブ林の場合、土壌中の汚染物や重油由来の汚染物を分解する菌（アルカン分解菌、芳香族分解菌）の生息状況をモニタリングする必要がある<sup>34</sup>。これは特に、重油由来の汚染物が土壌中に沈殿した際の中期以上の影響を観察するうえで重要である。マングローブ林の再生には、分散剤の使用等が考えられる。しかし、その複雑な構造から、事故により影響を受けた現地では、マングローブ林における重油の回収作業が困難を極める可能性がある。このような場合、生物学的環境修復（バイオレメディエーション）によるマングローブ林の再生が有効であることが報告されている<sup>33</sup>。バイオレメディエーション（Bioremediation）とは、分解菌等の微生物が持つ化学物質の分解能力を利用して土壌の汚染浄化を図る技術のことをいう。バイオレメディエーションは、浄化に時間を要する、その効果に不確実性がある等の不利点がある一方、コストが安く、浄化に伴う環境負荷あるいは環境攪乱が少ない等の利点がある<sup>60</sup>。バイオレメディエーションでは、土壌の汚染状況や分解菌の生息状況を把握することが必須となる。

#### 4-4. サンゴの移植やマングローブの植林を伴う場合

船舶の座礁・油流出事故後に影響を受けたサンゴ礁やマングローブ林の修復に、サンゴの移植やマングローブの植林を伴う際、より慎重なモニタリングが求められる。サンゴの移植は各地で実施され、移植後の増殖が見込まれるほどの技術が確立された<sup>33</sup>。一方で、サンゴ礁全体の修復における効果は限定的であるとされている<sup>61</sup>。サンゴの移植を実施する場合、その生育を阻害する要因（油濁による水中の濁り等）をはじめに解消することが最優先課題となる。同時に、水温、光、透明度等のサンゴの生育条件が整い、維持されているかをモニタリングする必要がある。そのうえで、サンゴの移植が必要と判断された場合には、生態系の遺伝的攪乱に最大限注意する、移植後の管理を徹底する等、

<sup>58</sup> Ministry of Blue Economy, Marine Resources, Fisheries and Shipping. Fish analysis-MV Walashio.

[https://www.scribd.com/document/475379411/Les-fruits-de-mer-de-la-region-de-Trou-d-Eau-Douce-a-Mahebourg-impropres-a-la-consommation#fullscreen&from\\_embed](https://www.scribd.com/document/475379411/Les-fruits-de-mer-de-la-region-de-Trou-d-Eau-Douce-a-Mahebourg-impropres-a-la-consommation#fullscreen&from_embed) (2020年9月18日閲覧)

<sup>59</sup> Hjermmann, D. Ø., Melsom, A., Dingsør, G. E., Durant, J. M., Eikeset, A. M., Røed, L. P., ... & Stenseth, N. C. (2007). Fish and oil in the Lofoten-Barents Sea system: synoptic review of the effect of oil spills on fish populations. *Marine Ecology Progress Series*, 339, 283-299.

<sup>60</sup> 製品評価技術基盤機構. バイオレメディエーションとは？.

<https://www.nite.go.jp/nbr/safety/bioremediation.html#:~:text=%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%AA%E3%83%AC%E3%83%A1%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%A8%E3%83%BC%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%B3%E3%83%EF%BC%88Bioremediation%EF%BC%89%E3%81%A8%E3%81%AF,%E4%BF%83%E9%80%B2%E3%81%99%E3%82%8B%E6%B5%84%E5%8C%96%E6%89%8B%E6%B3%95%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82> (2020年9月19日閲覧)

<sup>61</sup> 沖縄美ら島財団総合研究センター. サンゴの移植11-サンゴ移植の成功に向けて-.

[https://churashima.okinawa/userfiles/files/topics/event/2016/170105\\_sango11\\_all.pdf](https://churashima.okinawa/userfiles/files/topics/event/2016/170105_sango11_all.pdf) (2020年9月19日閲覧)

既存のガイドライン<sup>62</sup>に従い、専門家の意見も参考に実施する必要がある。マングローブ植林についてはある一定程度の効果が期待されるが<sup>63</sup>、植林活動に伴う土壌の攪乱や周囲の生態系への影響に注意する必要がある。また、サンゴ礁と同様、植林場所において油濁による汚染を解消することが最も重要である。そのうえで、植林の際は潮汐に伴う海水交換が十分あるか、立地環境（標高・地形）が適切か等、マングローブ生育に適した環境が整っているかを考慮した上で、自然加入が十分でないと判断される場合に実施する必要がある<sup>30</sup>。

## 5. モーリシャス事故からの環境回復へ向けた展望

パナマでの事例を参考にすれば、事故後のモニタリング調査の実施頻度は発生直後からの1年間（短期）は数か月毎に、2-5年（中期）は毎年実施する等、生態系の状態を把握し記録することが望ましい。しかしそれより長い時間経過（長期）の調査には、油流出事故以外の環境要因の影響が増加することを念頭に置く必要がある。また環境影響調査では、事故前の状態（ベースライン）の情報の有無、事故後の追跡における対照（コントロール）区設定が重要であり、早期に調査計画を立てサイトを特定する必要がある。事故発生現場でこうした条件を満たすことは通常困難な場合が多く、このため環境影響調査は複数の手法を組み合わせる行うことが大切である。

中でもサンゴ骨格や堆積物のボーリングコアは年縞を持ち過去の時間情報を有しており、うまく採取できれば有用な長期ログとして活用できる。特に炭酸塩のハマサンゴ骨格年輪は、同位体の手法を用いて月単位、季節毎のデータを取得することが可能である。また骨格に含有する有機物や重金属類は石油マーカ-の他にも様々な環境指標となり定量が可能で、汚染サイトのベースライン情報が無い場合に有効である<sup>35</sup>。ただし分析用に汚染したサンゴの掘削をする際は、それ自体がサンゴの負荷となる可能性があり、十分に考慮する必要がある。今回のモーリシャスの汚染エリアでボーリング調査を行う場合には、採取する限られた試料から最大限の情報を引き出すために、掘削サイトおよび分析項目と手法を事前によく吟味する必要がある。

本論考では船舶座礁・油流出事故後の環境モニタリングを概観したが、それには多層的な取組みが求められる。包括的なモニタリングを実施する場合は、事故が発生した現地のリソース（人員や予算、モニタリング実施能力）を鑑み、現場に即したモニタリングを計画する必要がある。WAKASHIOの座礁・油流出事故が発生したモーリシャスでは、モーリシャス大学やアルビオン水産試験場等の自国の研究機関が存在し、モニタリング体制がある程度確立されている可能性がある。しかし、サンゴ礁やマングローブ林の生息地の大部分は途上国や小島嶼開発途上国にあることから、事故後のモニタリングを計画・実施する際、日本を含む関係国による技術的支援を必要とする可能性が高い。

モーリシャスの座礁事故をめぐり、日本の環境相がモーリシャスの環境相との会談で、政府としてさらなる支援策も検討していると述べている<sup>64</sup>。また(株)商船三井も、モーリシャスの環境回復・地域貢献に向け自然環境保護・回復、寄付・資金拠出、地域社会産業への貢献、人的貢献の4本柱で取り組んでいくと公表している<sup>65</sup>。今後、こうした支援が十分にコーディネートされ、事故で影響を受けたサンゴ礁やマングローブ林等の生態系が修復され、かつ支援が地域社会で困窮している人々に行き届き事故前より良い状態になるよう、モニタリングおよび地域づくりが進むことが望まれる。

<sup>62</sup> 日本サンゴ礁学会。造礁サンゴの移植に関するガイドライン。 <http://www.jcrs.jp/old/information/ishoku-guideline.pdf> (2020年9月19日閲覧)

<sup>63</sup> Leung, J. Y., & Cheung, N. K. (2017). Can mangrove plantation enhance the functional diversity of macrobenthic community in polluted mangroves?. *Marine pollution bulletin*, 116(1-2), 454-461.

<sup>64</sup> ロイター。モーリシャス沖座礁事故、日本政府はさらなる支援策を検討 = 小泉環境相。 <https://jp.reuters.com/article/wakashio-koizumi-idJPKBN25U0TD> (2020年10月4日閲覧)

<sup>65</sup> 商船三井。WAKASHIO号事故に関するモーリシャスの環境回復・地域貢献に向けた当社の取り組みについて ~モーリシャスと共に~。 [https://www.mol.co.jp/sustainability/incident/pdf/20200911\\_presentation.pdf](https://www.mol.co.jp/sustainability/incident/pdf/20200911_presentation.pdf) (2020年10月4日閲覧)