

論文の内容の要旨

論文題目： 杉樹皮製油吸着材による海上流出油回収と微生物分解処理システムの開発

Research and Development of Sugi Bark Sorbent for Marine Oil Spill and Biodegradation Disposal System

氏 名： 齊 藤 雅 樹

海上での油流出事故は、短期間に大量の油が流出して汚染被害が発生するケースが多い。流出油は海岸などに漂着すると人間の社会生活や生態系に重大な影響を及ぼすため、海面や海岸からの迅速な回収・除去が求められる。油吸着材は広く使用される油回収資機材の一つであり、これまでは石油原料のポリプロピレン（PP）製品が使用されることが多い。

本研究では、杉樹皮を原料とする油吸着材を開発し、海上流出油回収への適用についてその吸油性能の面から確認するとともに、使用後処理の方法として微生物分解処理技術を開発し、その分解能力と環境負荷について検討を行った。すなわち、生分解性の杉樹皮製油吸着材（SBS）によって一旦、現場から油を回収し、閉鎖された空間である処理サイトまで回収物を運搬し、その中で油と油吸着材の両方について微生物分解を行い、油分が基準値以下になった後に残存物を環境中に戻すというモデルを提案し、その有効性を実験で確認するとともに、従来の石油原料製品の油吸着材を使用後に焼却処理するモデルと比較し、環境負荷（CO₂排出量）面から評価を行った。

SBS の開発については従来の PP 製油吸着材と同等の吸油性能すなわち低粘度油で 10～15、高粘度油で 15～20 程度の Sorbency Ratio（自重当たりの吸油量(g/g)）を持たせることを目標とし、繊維サイズや含水率と吸油性能の相関を調べ、吸油性能が最大となる条件を求めた。また、杉樹皮繊維の細孔分布と表面積など物理的観点や、リグニン成分など化学

的な観点から吸油性能とメカニズムについての検討を行った。

その結果、長さ 1~5cm の網目 600 μ m を通過しない杉樹皮繊維を絶対乾燥させた場合に、吸油性能が最大となることが判明し、Sorbency Ratio は低粘度油で 13.4、高粘度油で 16.5（高粘度対応タイプ）に達し、従来の PP 製油吸着材と同等の吸油性能をほぼ実現した（Table 1）。吸油メカニズムについては、リグニンの親油性を要因の一つとし、樹皮繊維のユニット間の空隙に毛管現象により油が吸収され、保持されることが推論された。このほか、杉樹皮の水酸基の疎水基置換による吸油性能向上の可能性についても示唆された。

Table 1 SBS の各種油における吸油性能（Sorbency Ratio 平均値(g/g)）

油種	粘度 (cSt)	SBS	ポリプロピレン製油吸着材の例	コットン製油吸着材の例
A 重油	5.7	13.4	15.0	16.5
B 重油	76	11.5	14.5	18.3
C 重油	1400	5.1 16.5*	14.9	10.7
植物油	61	12.7	12.1	19.2
潤滑油	140	13.8	11.1	18.0
水	—	0.14	0.25	0.40

(*)高粘度油対応タイプ

次に、SBS の実用化に向けて吸油性能を最大にする基本的な条件をもとに、水槽における吸油状況、挙動を観察する試験により製品形状の検討を行った。また、使用者へのアンケート調査、実海域油流出事故において作業者らの評価を受けた。加えて、現状の処理方法である焼却における安全性を検証した。

その結果、13 種類の試作品中、以下の 4 タイプが実用に適した形状として提案された。

S25 : Sorbent Sweep (Flat), 10000 x 250 x 10mm (吸着型オイルフェンス)

S50 : Sorbent Sweep (Flat), 10000 x 500 x 10mm (吸着型オイルフェンス)

B6S14 : Sorbent Boom + Sweep, 10000 x ϕ 60+140 x 10mm (吸着型オイルフェンス)

M50 : Enclosed Sorbent (Mat) + Rope, 500 x 500 x 10mm (1 unit) (吸着マット)

アンケート調査により、油回収性能については「まずまず」、全体的な使用感については「使いやすい」が大勢を占め、「続けて使用したい」という評価が 76%相当あった。また、ブルー・オーシャン号油流出事故において、SBS により流出油が回収され、実海域の事故での性能が確認された。加えて、A 重油を吸着させた SBS の焼却実験（800 $^{\circ}$ C前後）を行い、発生したダイオキシン類は大気排出基準を大きく下回り、SBS の焼却処分の安全性が確かめられた。

SBS の使用後処理の方法として微生物分解処理技術を検討した。実効性と安全性を両立すべく、バイオオーグメンテーションを *ex situ* で行う形とし、分解に資する微生物としてバーク堆肥を用いることを着想し、予備実験を皮切りに、ビーカー規模、小型～産業用の好気発酵処理装置での油分解実験を行い、SBS の微生物分解処理技術の実用化の可能性につき検討を行った。

C 重油を吸着させた SBS は、堆肥に埋設させ 1～数ヶ月経過すると残留油分が知覚できない程度となり、生成した堆肥を用いた場合に二十日大根および柴では生育阻害が認められなかった。一方、生分解性を持たないポリプロピレン製の油吸着マットは、活性な堆肥中であっても分解の様子は観察されなかった。

ビーカーや小型好気発酵処理装置での実験では油分の減少が見られなかったものの、中型好気発酵処理装置での実験においては 4～8 週間で油分は投入量の 4～50% のレベルまで減少した。この間、好熱菌、常温菌の双方で高いオーダーの生菌数が検出され、微生物活動の存在が示唆された。

次に、一定規模以上の系でバーク堆肥による油の微生物分解処理が機能するとの期待から、バーク堆肥製造工場における微生物活動ヤードを適用することの実現可能性を検証すべく、中規模フィールド（同 36 m³）および実用規模フィールド（同 100 m³）において微生物分解処理実験を行った。

その結果、SBS に吸着させた C 重油は、36m³ 規模の実験で開始直後の油分濃度 14,300±3,900ppm は 164 日後に 1,500±500ppm に、100 m³ 規模の実験で開始直後の油分濃度 8,600±2,300ppm は 170 日後に 1,400±400ppm となった。バックグラウンドが 430±140ppm であり、投入した C 重油の濃度は 1,000ppm 前後の値に至ったことがほぼ確認された(Fig. 1)。油分の定性分析により、C 重油に含まれる各種成分が微生物分解によりほぼ一様に減少している一方、特異的に残留している成分があることが示された。

また、微生物相の変化については、石油分解菌として働くとの報告がある CFB（サイトファーガ・フラボバクテリウム・バクテロイデスグループ）が油分解過程または分解後に特異的に確認され、油分解に関与している可能性が示された。パイル内の温度については実験当初は 60℃前後、90 日以降は 50℃以下、180 日時点で 40℃程度と徐々に下がり、微生物活動の低下などを示唆するものと考えられた。

実用の際に懸念される回収海水由来の塩分の影響についての検討では、実事故回収物の組成データおよび実験での油分濃度を基にした試算では 0.0012～0.26% の塩分が付加されるものの、一般的な堆肥の推奨範囲であることが判明した。また、微生物分解処理方式のコストを検討した結果、回収物における油分濃度が低い場合には微生物分解処理方式が有利になり、油分濃度が高くなれば不利になる傾向があることが示された。

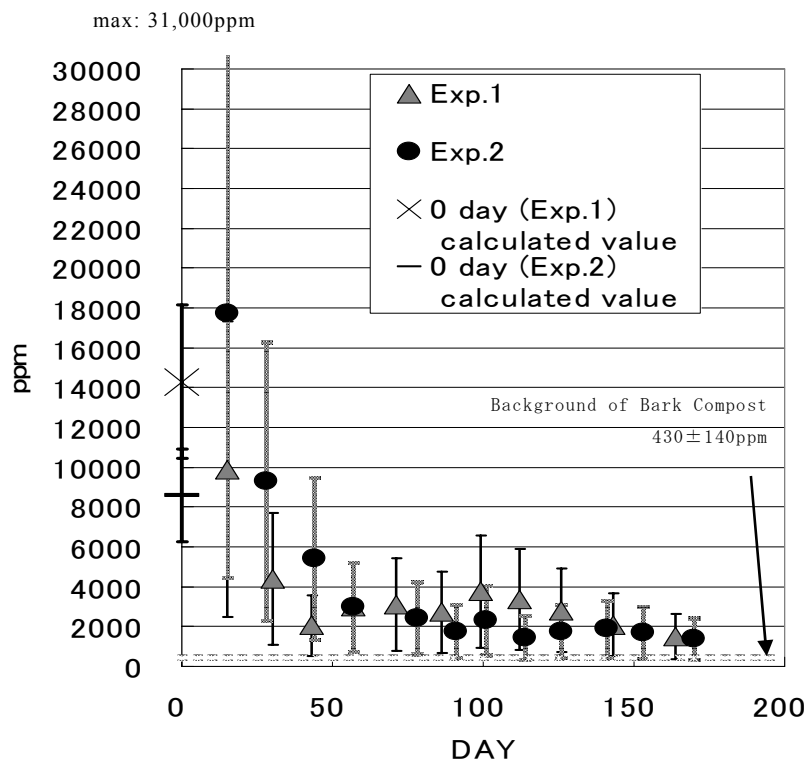


Fig. 1 微生物分解処理における油分濃度変化

油分汚染土壌の予想環境基準値 1,000ppm 前後まで油分濃度が減少することが確認され、現行の「焼却処理」に替わり「微生物分解処理」が技術的に可能になったため、SBS と従来の石油原料製品との環境負荷 (CO₂ 排出) の比較をライフサイクルアセスメント (LCA) の手法により評価を行った。

その結果、油吸着材の LCA において CO₂ 排出の最大要因は処理段階にあり、同じ SBS の比較では、焼却処理より微生物分解処理の方が CO₂ 排出量は少ないことが判明した。また、回収物における油分濃度が低いほど微生物分解処理が CO₂ 排出の面で有利になり、SBS と PP 製油吸着材の製造・使用・処分を通じた CO₂ 排出量の比は最大約 1:3 であり、後者を前者に置き換えた場合に C 重油 1t 回収あたり約 8.3t の CO₂ 排出削減となることが示された。

現在、広く普及している「PP 製油吸着材」+「焼却処理」に対して、本研究の提案する「SBS」+「微生物分解処理」の方式は、吸油性能がほぼ同等で、環境負荷 (CO₂ 排出量) 低減に貢献することが明らかになり、低環境負荷型の油回収・処理システムを構築することが可能であることが示された。