

杉樹皮製油吸着材および微生物分解処理技術の実用化について

大分県産業科学技術センター

地域資源担当主任研究員 齊藤 雅樹

春になると私達を悩ませる「杉」。花粉症の方は「スギ」と聞いただけで鼻がムズムズするかも知れません。杉は青森以南で日本中に植林されている木であり、以前は杉の皮で屋根を葺いたり、家の外壁材として使われたりと広く利用がなされていました。しかし、手作業で大切に皮が剥かれていたのは昔の話で、現在では機械で剥皮するので繊維状の杉の皮が大量に発生します。全国で発生する杉樹皮は年間 50 万 m³とも言われ、ここ数年は環境面から焼却が難しくなったので、全国の自治体ではその処分に苦慮しています。

この杉樹皮を原料とする油吸着材の開発は、平成 10 年度に私共の大分県産業科学技術センターで開始いたしました。日本財団の調査研究事業として平成 13 年度まで取り組み、(独)

海上災害防止センターの指導を受け、杉樹皮製油吸着材「^{すぎ} ^{ゆとり}杉の油取り」を実用化しました。

また、平成 14 年度からは(独)海上災害防止センター委託事業として、使用後の杉樹皮製油吸着材を微生物で分解処理する方法について、現在まで研究開発を行っています。

そもそも、杉樹皮を原料に油吸着材を開発しようと着想したのは、従来品の大半を占めるポリプロピレンなどの石油原料製品を見てのことです。一度、海上などに流出した油は、商品価値ゼロの「ゴミ」です。それを回収するのに「バージン」の石油原料製品である油吸着材を使うことに我々は抵抗感を覚えました。たまたま大分県は杉が特産です。全国第二位の杉の産地である大分県では特に杉の樹皮が供給過剰となり、処分に困っています。この杉の樹皮を活用して油吸着材ができないか、これが本製品の着想です。



粉碎・乾燥した杉の樹皮

杉の樹皮は、屋根や壁に使われるように、リグニンという水をはじいて油となじむ成分が含まれています。リグニンはどの木の皮にも含まれており、これによって樹木は雨などの水分から内部を守っているのです。杉の外樹皮は 52%がリグニンと言われ、あらゆる樹種でもトップクラスです。また、杉樹皮の繊維は細いユニット繊維が短手方向に連結する構造になっていて、この連結部分が油タンクの役割を果たすので、油をよく吸って保持す

ると考えられています。

この性質を活かし、杉樹皮を自然乾燥・粉碎し、コットン不織布の袋に入れたシンプルな構造で海上に流出した油を吸着・回収することができます。これが杉樹皮製油吸着材「杉の油取り」です。現在、特許も成立し（第 3697468 号）45cm 角のマット型、それを綿ロープで連結した万国旗型（45cm×10m）、河川用オイルフェンス型（45cm×5m、20m）などが、大分県竹田市にあるメーカー「ぶんご有機肥料(株)」から製造・販売されています。また、国土交通省の型式承認（P-577）、エコマークの認定（No.04115009、類型番号 115）を受けています。

杉樹皮製油吸着材は熱処理をせず、ほとんど縫製作業のみで製造ができるので、生活保護者や障害者の方が働く授産施設に製造が委託されています。授産施設には高い縫製技術を持った方が多いのですが、最近では中国などアジア諸国に縫製の仕事が委託されてしまい、せっかくの特技を活かせず軽作業が中心となっていました。このため、杉樹皮製油吸着材の縫製については大変熱心に取り組んで頂き、喜ばれています



授産施設での杉樹皮製油吸着材の製造（縫製）

これまでに使用された実績としては、海や河川での油流出や、工場の水槽からの油除去などがあり、中でも平成 16 年 9 月の広島・廿日市で発生した木材運搬船ブルー・オーシャン号転覆事故では、流出油のほとんどが杉樹皮製油吸着材によって回収されました。作業員からは「これは油をよく吸う」との評判が聞かれました。



平成 16 年 9 月 「杉の油取り」による流出油の回収作業

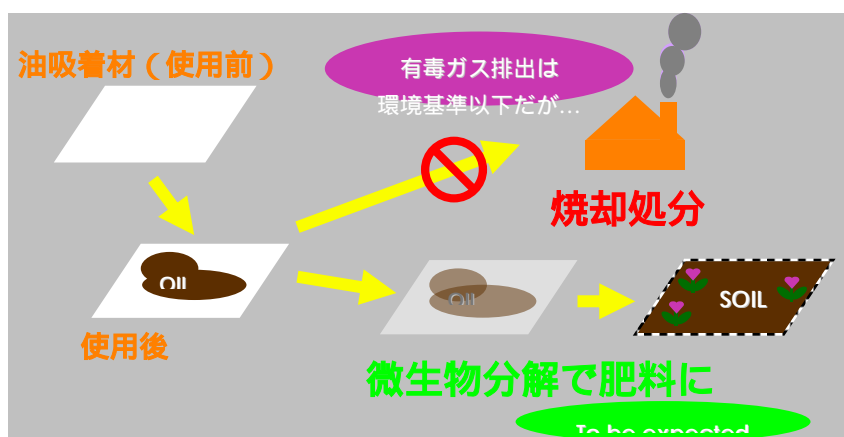
なお、杉樹皮製油吸着材はこれまでの油吸着材に比べて特別に高性能である、という訳ではありません。実験データでは自重の 9.3~9.7 倍の B 重油を吸着し、従来のポリプロピレン製やコットン製に比べてほぼ同等の吸油性能を持っていることがわかります。また、価格もいづれもキロあたり 1,600~2,000 円程度であり、性能・価格とも同じレベルです。

一方、原料が山のゴミ「杉樹皮」である、製造に熱処理工程がない、生分解性の 100%天然素材であるということから、環境には良い製品であると言えます。つまり、杉樹皮製油

吸着材とは、従来品に比べて「性能・コストはほぼ同じだが環境に良い」のが特徴であるとご理解頂ければ幸いです。

このように紹介しますと、油を吸わせた後はどう処分するのですかと、以前よく質問を受けました。現状では「焼却処理」です、と回答すると「なんだ、ポリ製品と同じですね、もったいないですね」とのご指摘をよく頂きました。焼却の際のCO₂発生量などは杉樹皮製油吸着材の方が少なく、また適切な条件下ではダイオキシン発生なども基準よりずっと低く安全に処理できるとはいえ、今の時代、焼却が最適の処理方法であるとは言えません。

そこで、我々は杉樹皮製油吸着材の生分解性である特徴を活かし、微生物の力で分解処理する方法を着想しました。微生物分解と言え、バイオレメディエーションなど油汚染現場での環境修復をイメージしますが、今回の方法は、油吸着材で回収した油を、安全な処理場所に運び、そこで吸着マットごと、油ごと微生物により分解処理しようとするものです。現場でのバイオレメディエーションは地元住民や関係機関の理解が得られないと実施できない場合が多いですが、産業廃棄物処分場などの決められた場所に運び、安全な管理のもとで処理するこの方法は、事故がどこで起きても対応が可能です。



油吸着材の微生物分解処理の概念

用いる微生物は特別な種類ではなく、通常的环境に生息する土壌微生物です。パーク堆肥と呼ばれる樹皮と牛糞・鶏糞などを混合して発酵させる堆肥には、生成過程でこれらの微生物が活発に活動しており、堆肥パイル内部は 60~70℃にも達します。試みに、この堆肥の中にC重油を吸着させた杉樹皮製油吸着材を埋めたところ、一定期間を経た後に油臭・油膜が観察されなくなりました。

そこで、この方法に手ごたえを感じた我々は本格的に実験を行うこととしました。ピーカーレベルの実験や、好気発酵処理装置などでの実験を経て、実用を見据えたフィールド

実験を行うに至りました。

パーク堆肥の生成過程にある活性なものを 100m^3 (約 50 トン) 用意し、パイル (山) 状に積み上げます。直系約 8m、高さ 3.5m 程度の円錐台の形になります。このパイルを作る際に、下から上まで 7 層に分け、それぞれの断面に C 重油を吸油させた杉の油取りのマット型 (45cm 角) を入れていきます。1 枚あたり、1kg の C 重油を含ませ、合計 300 枚使用するので、合計 300kg の C 重油が投入されたこととなります。油分濃度は計算上、6,000ppm-wet です。



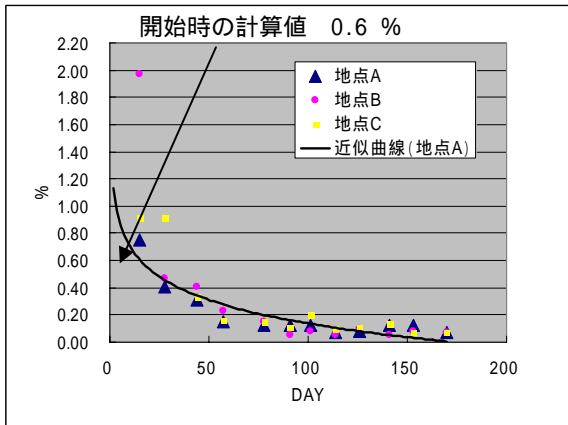
パイル断面に並べた吸着マットを被覆する様子

また、同様に 36m^3 (約 18 トン) のパーク堆肥パイルで 180kg の C 重油を分解処理する実験 (油分濃度 10,000ppm-wet) も併せて行いました。

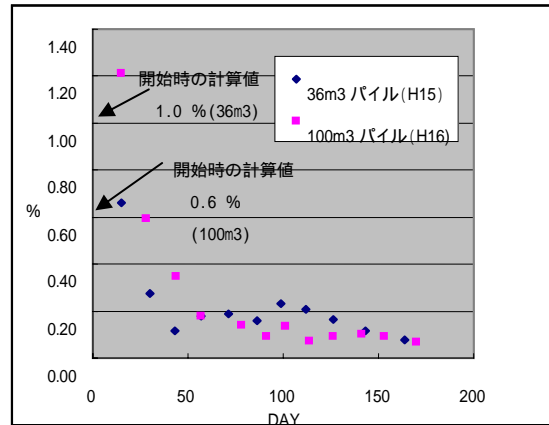
パーク堆肥は、好気発酵させる酸素供給のために定期的に攪拌 (切り返し) を行います。活発な微生物活動を維持するため、今回の実験においても約 2 週間に 1 回の頻度で攪拌を行いました。パワーショベルを用いて、パイルの上側からすくい取ったものを隣接するサイトに順次移動させます。この際にサンプルを採取して、油分濃度を測定します。サンプルは上、中、下段それぞれ 9 箇所合計 27 箇所から採取します。

こうして油分の変化を測定したところ、図に示すように開始直後の油分濃度は 60 日後に約 $1/2$ 程度に、120 日後に約 $1/5 \sim 1/6$ に低下していることが判明しました。一方、120 日後以降には油分濃度に大きな変化は見られませんでした。また、 36m^3 のパイルによる実験と、 100m^3 パイルによる実験を比較すると、いずれも時間経過とともに油分が減少する様子が明らかですが、より大規模に行った 100m^3 パイルの方が、 36m^3 パイルより安定に減少する傾向が見られます。

油の臭気については、40 ~ 60 日後程度までは判別可能な程度に感じられましたが、その後は徐々に臭気に変質し、もとの投入物が重油であることを知らない人間には油の臭気かどうか判別がつかない状態に変化しました。また、60 日経過時点で皮膚への油の付着は感じられず、周囲の水溜りにおける油膜も観察されなくなりました。

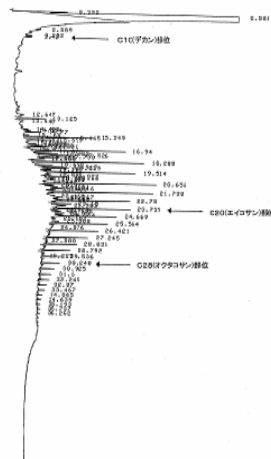


油分濃度の変化 (100 m³; 濃度はwetでのもの)

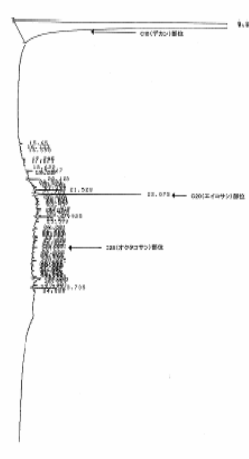


平均油分濃度推移の比較 (濃度は wet でのもの)

油分量が確かに減少することがわかったので、次に、投入したC重油が微生物分解によりどのように変化するかを、ガスクロマトグラフィー(GC)による定性分析により調査しました。今回実験に使用したC重油のクロマトグラムと、58日経過時点のバーク堆肥パイルの残留油分のクロマトグラムを図に示します。C重油のピーク分布は、C17付近を中心とした分布となっていて、規則性のあるシャープなピークは直鎖の炭化水素とみられます。一方、58日経過時点のクロマトグラムでは、ほぼまんべんなく各成分が減少している様子が観察されます。ただし、ピークが高いまま残留しているいわゆる“食べ残し”成分も見られ



投入したC重油のクロマトグラム



バーク堆肥パイルのクロマトグラム (58日経過時点)

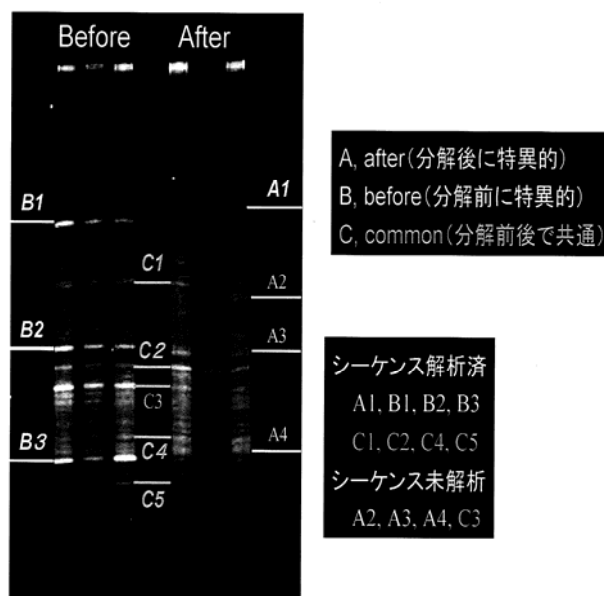
ます。これは今回のバーク堆肥微生物では分解が困難な成分も中にはあることを示してい

ますが、他所で行われている微生物を用いた油分解実験でも一部の成分が残留するという報告があります。

ここまでの実験により、杉樹皮製油吸着材に吸油させたC重油がバーク堆肥パイルの中で分解され、油分が減少することがわかってきましたが、この工程の微生物相がどのように変化しているのかを変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法（D G G E）の手法を用いて調べました。この実験は広島大学生物圏科学研究科・長沼毅助教授に依頼しています。微生物相の変化を特定することは、今後の実用化に向け、技術自体の信頼性を向上すると共に、分解工程の安定化および再現性確保に貢献するものと考えられます。

結果を図に示します。「Before」は分解前に特異的なもの、「After」は分解後に特異的なもの、「Common」は両者に共通するものを指します。Common（共通なもの）の *Ureibacillus thermosphaericus*（ウレイバチルス属）は好熱菌です。

After（油分解後に特異的）に、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）が確認されています。CFB はエクソン・バルディーズ号など油流出事故のバイオレメディエーションにおいて増え、石油分解菌として働く微生物であるという報告がされている微生物です。この微生物が今回のバーク堆肥パイルでの実験において、油分解に関与している可能性が高いと思われます。



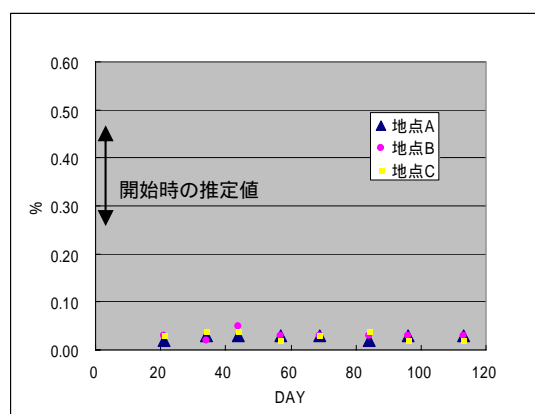
油分解前後のD G G E パターン比較

このように実験において、微生物分解処理の実用性、有効性が徐々に明らかになっていきますが、この技術が実際の油流出事故でどのように機能するかを試してみました。先述のとおり昨年、広島・廿日市で発生した木材運搬船ブルー・オーシャン号転覆事故では、流出したA重油およびC重油がほとんど杉樹皮製油吸着材によって回収されたことを紹介しました。その回収油および使用後のマットの一部を分解処理場まで運搬し、パーク堆肥パイルにおいて実際に分解処理が可能かどうか、実験を行いました。



広島廿日市港で油を吸着した「杉の油取り」をパーク堆肥に入れて分解実験する様子

杉樹皮製油吸着材のマット型：350枚、オイルフェンス型：259mに吸油・回収された油は、濃度測定により116～232kgと推定されます。これを100m³のパーク堆肥パイルに埋め込み、微生物分解にて処理しました。油分の変化は図のようになり、最初の測定20日経過時点から通常のパーク堆肥同様の0.03%程度の値を示しました。



油分濃度の変化 (100 m³; 実事故回収油; 濃度はwetでのもの)

これは我々にとって意外な結果であり、本来、先の実験で得られたグラフのように、油分濃度が徐々に減少していくものを想定していましたが、分解速度が速かったのか、すでに第一回目の計測時点で油分量は最低レベルにまで落ちていたのです。今回の結果がこのような原因として、例えば先の実験（C重油）と今回（A重油とC重油の混合）では油種が異なるために進行速度に差異が生じているという解釈が出来ます。A重油のような軽質油には揮発成分も多く含まれ、分解が比較的容易な低分子の成分も多いと考えられます。

いずれにせよ、実海域における油流出事故の回収油および杉樹皮製油吸着材を微生物分解処理し、油分濃度変化を定量的に調査する試みは今回が初めてであり、今後、油分濃度、パイル規模、油種などの異なるデータを蓄積することにより、実用化に必要な知見が得られると考えられます。

さて、以上のように、杉樹皮製油吸着材の微生物分解処理技術は、すでに実用段階まで開発が進んだと考えられますが、その目的でもある「環境負荷」はどれだけ低減できるのかについて調査しました。

ライフサイクルアセスメント（LCA）という概念があります。製品の製造、使用、廃棄の生涯にわたってどの程度、環境に負荷を与えるかについて、例えばCO₂排出量などで比較し、評価するものです。例えば、燃費の良い自動車であっても、製造するのが難しくて多くの原材料を消費するような場合、本当に環境に良いのか疑問が出てきます。つまり、その製品が「環境に良い」のかどうかは製品生涯を通じてみないと本当に評価が出来ないという考え方です。

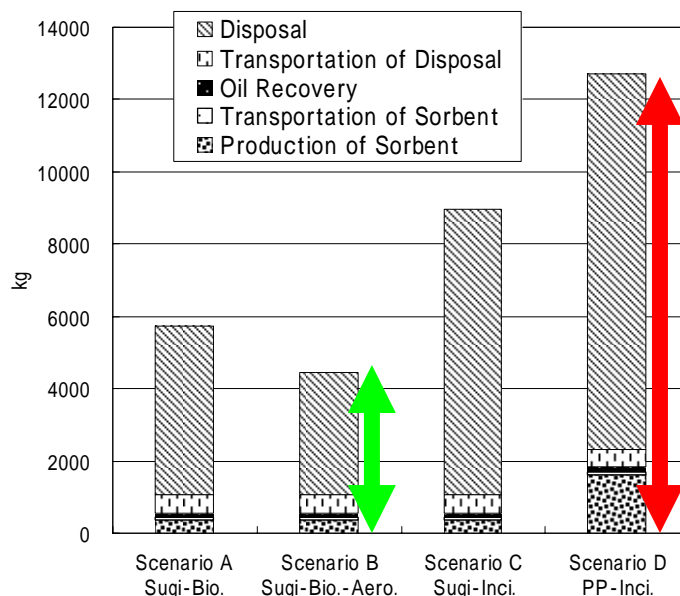
このLCAの手法により、油吸着材で油を回収する際のCO₂排出量はどの程度であるかを試算しました。シナリオA～Cでは杉樹皮製油吸着材を使用し、それぞれパーク堆肥を用いた微生物分解処理（嫌気）、同（好気）、焼却処理とし、シナリオDとしてポリプロピレン（PP）油吸着材を焼却処理する合計4種類としました。各プロセスの運用段階を対象とし、処理施設の建設、運搬車両、作業船などの製造段階は対象外としました。

計算は実際の油濁事故（ブルー・オーシャン号）において実測した回収物における油分、海水、吸着材自重の組成を基に行いました。焼却処理では、実際に回収油を処理している業者からヒアリングを行い、回収物の25%の燃料（A重油）を使用するものとしました。また、いずれの場合も回収油はすべて水とCO₂に分解されるものとしました。微生物分解処理では、CH₄発生量も併せて算出し、温暖化係数（21）を乗じCO₂相当にして加算しました。なお、バイオマス由来のCO₂については排出量に算入しないこととしました。結果を図に示します。

これを見ると、まずCO₂の排出は製造・使用・運搬段階に比し、処理段階の割合が大部分を占めていることがわかります。つまり、製造段階や運搬段階を見る限り、どれを選択し

ようとCO₂排出に大きな違いはありません。例えば、杉樹皮製（シナリオA～C）に比し、PP製（シナリオD）は製造段階でのCO₂排出量が約4倍となっていますが、全体から見てその差は大きいとは言えません。また、運搬段階では、距離 500kmと比較的遠い場合を想定していますが、例えばこれが 1,000～2,000kmになっても全体のCO₂排出量に大きく影響しないことがわかります。

一方、処理段階になると、シナリオ間の違いが顕著に見られます。同じ杉樹皮製（シナリオA～C）の比較において、微生物分解（シナリオA,B）が焼却処理（シナリオC）に比して処理段階でのCO₂排出量がかなり少ないことがわかります。また、好気処理（シナリオB）ではCH₄発生量が少ないため、嫌気処理（シナリオA）よりも温暖化への寄与は小さくなります。また、同じ焼却処理での比較では、炭素の比率の違いから、杉樹皮製（シナリオC）はPP製（シナリオD）に比してCO₂排出量は少ないことがわかります。



油吸着材（杉樹皮製油吸着材、PP）のCO₂排出量の比較

端的に言えば、「PP製品を焼却処理する場合（赤の矢印）」と、「杉樹皮製油吸着材を微生物分解処理する場合（緑の矢印）」ではCO₂排出量が3倍ほど違うことになり、「杉樹皮製品」+「微生物分解」の組合せが「地球環境にやさしい」処理方法であることが一応、データとして示されたと言えます。

ただし、このような環境負荷試算の結果は根拠となるデータや計算方法が仮定に基づくものが多いため、必要な説明を認識せず結果のみを解釈することは避けるべきであることをご留意頂きたいと思います。

また、現在まで各種の実験により、杉樹皮製油吸着材の微生物分解技術の実用性を確認していますが、今後実用化にあたっては、生成した堆肥の安全性などを慎重に検証していく必要があると考えられます。

杉樹皮製油吸着材はもともと製造段階に熱処理工程を持たない製品です。加えて、処理段階が微生物分解になれば、製品生涯で熱処理が一切ない、究極の環境配慮型の油回収・処理システムとなることが期待されます。一日も早い実用化を目指して、開発を続行しています。

これまで杉樹皮製油吸着材を使用して頂いた海上保安関係者や油防除事業者の皆様からは、良い点、改善すべき点のご指摘のほか、「こういうタイプが欲しい」など多くのご提案を頂いております。これを受け、昨年度は「河川用小型」を新たに開発するなど現在も改良に取り組んでいます。引き続き、忌憚のないご意見を頂ければ幸いです。

油流出事故は起こらないに超したことはありませんが、統計的に見ると必ず何処かで事故が発生しています。平成 9 年のナホトカ号事故では回収された油は全量が焼却処理されましたが、次に大規模事故が発生した場合、再び「すべて焼却処理します」と国際社会に向かって胸を張れる時代ではなくなっています。日本は環境先進国だと誇るためにも、今後の油流出事故には微生物分解処理で対応できるように微力を尽くしたいと思います。