

油吸着材のライフサイクルアセスメントに関する研究

正員 斉藤 雅樹* 小倉 秀**
木本 弘之** 永水 堅***

Life Cycle Assessment of Oil Sorbent

by Masaki Saito, *Member* Suguru Ogura
Hiroyuki Kimoto Katashi Nagamizu

Summary

This paper describes the life cycle assessment of sorbent (oil absorbent) in estimation of CO₂ emissions produced throughout the life cycle for each scenario of sorbent ; Sugi Bark Product and Anaerobic/Aerobic Biodegradation Disposal (Scenario A/B), Sugi Bark Product and Incineration Disposal (Scenario C) and Polypropylene Product and Incineration Disposal (Scenario D). CO₂ emission is the highest in disposal stage in all scenarios. In comparison of LCA of SBS (Sugi Bark Sorbent; scenario A, B, C), CO₂ emission is lower in biodegradation disposal than in incineration disposal. Biodegradation disposal has more advantage in CO₂ emission than incineration disposal, when the oil content of recovered substance is lower. The ratio of total CO₂ emission of SBS and Polypropylene is 1:3 at most; the replacement of Polypropylene sorbent with SBS can reduce 8.3t-CO₂ emission in recovering 1t of Bunker C oil.

1. 結 言

ライフサイクルアセスメント (LCA) は、製品やサービスの生産・使用・廃棄にわたる環境影響を、製品生涯あるいはサービス全体について評価する手法である。

海上流出油の対策資機材として広く使われる油吸着材は、現在 9 割以上のシェアをポリプロピレン不織布など石油原料製品が占める。筆者らは年間 50 万 m³ が全国で産出されて供給過剰状態にある「杉樹皮」を原料とする油吸着材 (SBS: 杉樹皮製油吸着材) を開発し¹⁾、既に油濁事故で使用されている。

バイオマス原料の油吸着材は「石油原料製品など従来品と同等の性能、価格で、環境負荷が低い」という位置付けであり、例えば杉樹皮製油吸着材では製造時のエネルギー消費は石油原料製品の 1/3 以下である²⁾。また、処理時には焼却に替わり、微生物分解が可能である³⁾など、製造・使用・処理時における環境負荷が小さいと考えられてきた。

本研究では、従来未検討であった油吸着材の環境影響につ

いて、石油原料のポリプロピレン製品とバイオマス原料製品 (杉樹皮製) とを LCA の手法を用いて CO₂ 排出量の観点から検討評価し、バイオマス原料の油吸着材の環境負荷における優位性について示した。

2. 評価の方法

2.1 目的

杉樹皮製油吸着材 (生分解性のバイオマス原料製品) と、従来広く使われるポリプロピレン製油吸着材 (石油原料製品) の両者につき、製造、使用、処理段階までを LCA の手法で定量化し、原材料の違い、処理方法の違いによる環境負荷を明らかにする。

2.2 評価手法

(1) 評価条件の設定

システムの機能範囲は、「海上に流出した C 重油 1 トンを吸着マットで回収し、処理サイトに運搬し、処理するまで」とする (Fig. 1)。

(2) 環境負荷項目

環境負荷項目は CO₂ 排出量とする。ただし、微生物分解によって生ずる CH₄ は温暖化係数 (21) を乗じて CO₂ 相当として算入する。

(3) 積算基準と使用するデータベース

積算は積み上げ方式とし、企業からの情報提供などにより

* 大分県産業科学技術センター

** (独)海上災害防止センター

*** ぶんご有機肥料㈱

原稿受理 平成 18 年 5 月 10 日

積算する。使用するデータベースについては、重油や軽油など一般的な工業製品については産業連関表⁴⁾などの文献による数値を利用する。

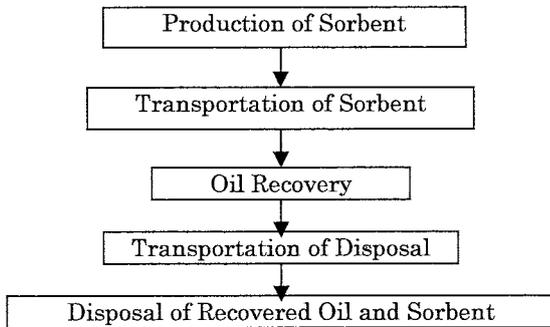


Fig. 1 System Boundary of LCA

(4) 評価対象システム

シナリオ A~C では杉樹皮製油吸着材を使用し、それぞれバーク堆肥を用いた微生物分解処理（嫌気）、同（好気）、焼却処理とする。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（Table 1）とする。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する。これは油吸着材の市場がさほど大きくないため、特に SBS については製造から処理を通じて専用施設・設備を持つ場合がほとんどなく、別用途の施設・設備を必要時のみ借り受けて使用しており、それらによる CO₂ 排出量は製造時の約 1% 以下であり、またポリプロピレン製の製造時の専用施設・設備の建設にかかる CO₂ 排出量についても同程度の比率とされるので⁹⁾、今回の検討では素材の製造時の製造設備建設時の CO₂ 排出量は対象外としている。

Table 1 Scenario of LCA

Stage	Production (Material)	Disposal
Scenario A	Sugi Bark	Biodegradation, Anaerobic
Scenario B	Sugi Bark	Biodegradation, Aerobic
Scenario C	Sugi Bark	Incineration
Scenario D	Polypropylene	Incineration

(5) 各条件および仮定について

油吸着材の性能指標である油吸着率は良好な一定条件下で測定されるが、実際の現場においては浸漬時間、波や風、オペレータの熟練度などの制約により吸油量は公称値を通常下回る。また、油と共に海水やゴミも回収され、ナホトカ

号事故における回収物中の油分の占める割合は数%程度との報告もある⁵⁾。そこで、実際の油濁事故（ブルーオーシャン号、2004 年）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パターン 1 とし、十分に水切りを行って海水量が減少したとの想定をパターン 2、また、国土交通省基準値（自重の 6 倍吸油）どおりに吸油が可能でかつ海水を全く吸着しない理想的な場合をパターン 3 として計算することとする（Table 2）。本 LCA の機能範囲に設定した「油 1t の回収」に換算した場合を Table 3 に示す。

Table 2 Weight Ratio of Recovered Material

	Oil	Sea Water	Sorbent
Pattern 1	17%	70%	13%
Pattern 2	26%	54%	20%
Pattern 3	86%	0%	14%

Table 3 Formation of Recovered Substance in Oil Spill (kg)

	Oil	SeaWater	Sorbent	Total
Pattern 1	1,000	4,118	765	5,882
Pattern 2	1,000	2,077	769	3,846
Pattern 3	1,000	0	167	1,167

(6) 製造時における条件と仮定

杉樹皮製油吸着材の原料は重量組成比（実測値）で、杉樹皮 73%、コットン 17%、パーライト（黒曜石発泡体）10% 程度である。工程は、製材所にて原木から剥皮されて粗粉砕された状態で納入される杉樹皮（廃棄物）を、選別後に風乾によって含水率を下げた後、パーライトと混合し、コットン不織布の外袋に充填し、ミシンにて縫製するものである。杉樹皮は廃棄物であるため原料調達については計上せず、コットンとパーライトの原料調達、原料輸送（トラック）、製造ラインのエネルギー（電力）、製品輸送（トラック）の積み上げ方式により算出する。

コットンはメーカーから提供された製造エネルギーを全て A 重油で賄ったと仮定し、CO₂ 排出量データとし、パーライトについては産業連関表のデータを利用した。原料輸送（トラック）、製造ラインのエネルギー（電力）、製品輸送（トラック）についてはメーカーからのヒアリングによる軽油および電力使用量に基づいた。

ポリプロピレン製については、原料プロピレンの重合と繊維化のプロセスエネルギーのデータがメーカーからのヒアリングにより入手できたため、これを全て A 重油で賄った

と仮定し、これに原料プロピレンの CO₂ 原単位 (素材)⁷⁾ を加えて、CO₂ 排出量データとする。

(7) 運搬時における条件と仮定

製造現場から作業場所までの製品運搬および作業場所から処理場所への回収物運搬は 500km のトラック輸送とし、燃料のみを計上する (製品運搬: 10t 型に 5t 積, 燃費 3.0km/L、回収物運搬: 4t 積, 燃費 4.0km/L)。これはブルーオーシャン号油濁事故において現場 (広島県廿日市市) と製造現場・処理場所 (大分県竹田市) 間で実際に輸送したデータに基づく。

(8) 回収時における条件と仮定

回収作業では作業船の燃料 (実働 5 時間, 60PS, 燃費 170g/PSh) のみを計上する。

(9) 処理時における条件と仮定

処理過程については、業者へのヒアリングにより焼却処理の際に重量換算で回収物の 25% の A 重油を助燃剤として使用しているとのデータが入手できたため、この数値を使用するものとする (パターン 1 の場合)。また、パターン 2 では海水量が少ないことから助燃剤をパターン 1 の半分にあたる回収物の 12.5% の使用とし、パターン 3 では回収物が可燃物であり助燃剤を使用しないものとする。

微生物分解については既存の堆肥化工程がそのまま利用できかつ生成物がすべて堆肥として利用できるものと仮定し、バーク堆肥生成の負荷は算入しないものとする。

また、焼却において回収油はすべて水と CO₂ に分解されるものとする。微生物分解においては一般的堆肥化の際の発生率をもとに回収油からの CH₄ 発生量を算出し、温暖化係数を乗じ CO₂ 相当にして計上する。なお、カーボンニュートラルの考え方⁸⁾から、焼却・微生物活動を問わず、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する。

なお、焼却の際の CO₂ 発生量には炭素の割合が必要であるが、それぞれの油吸着材および原料の組成詳細について、Table 4~10 に示す。樹皮の成分組成は文献 9) を参照し、5% 未満の微量成分を除き、単純化したものである。各種の油など一般的な物質については産業連関表⁴⁾や環境省発行のデータ¹⁰⁾に基づいた。

Table 4 Formation of SBS

Sugi Bark	73%
Cotton	17%
Obsidian Perlite	10%

Table 5 Formation of Bark

Outer Bark	80%
Inner Bark	20%

Table 6 Composition of Cotton

Cellulose	92%	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n
Water	8%	H ₂ O

Table 7 Composition of Outer Bark (with Simplification)

Cellulose	35%	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n with Simplification
Lignin	55%	(C ₁₀ H ₁₅ O ₂) _n
Saccharide	10%	with Simplification C _n (H ₂ O) _m →C ₆ (H ₂ O) ₆

Table 8 Composition of Inner Bark (with Simplification)

Cellulose	40%	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n with Simplification
Lignin	25%	(C ₁₀ H ₁₅ O ₂) _n
Saccharide	35%	with Simplification C _n (H ₂ O) _m →C ₆ (H ₂ O) ₆

Table 9 Composition of SBS and Material (C, H, O)

	C	H	O	Inorganic
Sugi Bark	57.2%	7.6%	35.2%	0.0%
Cotton	40.9%	6.6%	52.5%	0.0%
Obsidian Perlite	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
SBS	48.8%	6.7%	34.7%	10.0%

The total value does not always correspond by round off.

Table 10 Composition of PP Sorbent and Material (C, H, O)

	C	H	O	Inorganic
PP Sorbent	90.0%	10.0%	0.0%	0.0%

PP (polypropylene) : [CH₂-CH(CH₃)]_n

3. 結果および考察

3.1 製造段階における CO₂ 排出原単位の比較

SBS の製造時の CO₂ 排出原単位は、0.47kg-CO₂ となった (Table 11)。一方、ポリプロピレン製の製造時の CO₂ 排出原単位は 2.30 kg-CO₂ となった (Table 12)。なお、ポリプ

ロピレン製の値は成形工程を含んでいないため、真の値はもう少し多い可能性がある。例えば、最終製品を産業連関表のもの（合成繊維の分類、2,000円/kgと仮定）から求めると5.16 kg-CO₂となり、積み上げ方式で求めた場合の2倍以上となる（Table 12）。

SBS については、製造段階における手作業工程の多さを考慮する必要がある。マンパワーにおける CO₂ 排出をどのように評価するかについて工業分野では無視されることが多いが、例えば農業などマンパワーが多くを占める分野もあるため、現在の LCA では少なくとも以下の3種の方法があるとされる¹¹⁾。

①生活エネルギー支出としてまかなわれるとして評価しない

②生物人間の食料摂取エネルギー標準値（0.073TOE/

人・年）

③全生活エネルギー消費/人（世界平均：1TOE/人・年）

今回得た 0.47kg-CO₂の値は①によりマンパワー分を算入していない場合の数値である。試みに②および③の場合のエネルギーをA重油換算で計上した場合、製造時におけるCO₂排出原単位は、それぞれ②の場合で0.56 kg-CO₂、③の場合で1.96 kg-CO₂となる。③はSBSの製造スタッフが生活すべてで排出するCO₂を全量含めた、いわゆるマンパワーを最大評価して算入した数値であるが、未だポリプロピレン製の最低値2.11 kg-CO₂よりも低い数値であり、SBSの製造段階におけるCO₂排出の少なさを示している。なお、実際には完全な世界的エネルギー市場が成立していないので、マンパワーをどう評価するかの判定は先送りされている¹¹⁾。

Table 11 CO₂ Emission Unit in SBS Production

Process	Item	Fuel	CO ₂ Emission(kg) per 1kg of SBS Product	CO ₂ Emission(kg) per 1kg of Material	Reference
Material	Cotton	Bunker A Oil	0.133	0.787	calculated from the energy value (2,650kcal/kg) of the manufacturer
Material	Obsidian Perlite	—	0.106	1.08	calculated from the value (1.94tC/million yen) of “other structural clay products” in the “Inter-industry Relations Table”, gravity 0.1 and price 1,000yen/66L
Material Transportation	Truck (fuel)	Diesel	0.053	—	calculated from the value (40L/2,000kg; SBS) of the manufacturer
Production	Electric Power	—	0.088	—	calculated from the value (530kwh/2,000kg; SBS) of the manufacturer and 0.33kg-CO ₂ /kwh of “Oita Environment Household Account Book”
Products Transportation	Truck (fuel)	Diesel	0.093	—	calculated from the value (70L/2,000kg) of the manufacturer
Production Total ①		Total ①	0.47	calculated from the value (Diesel : 2.65kg-CO ₂ /L)	
Production Total ②		Including Man Power ②	0.56	calculated from the value (Bunker A Oil : 2.80kg-CO ₂ /L) calculated from the value (Bunker C Oil : 2.99kg-CO ₂ /L)	
Production Total ③		Including Man Power ②	1.96	calculated from the value of reference 10)	

Table 12 CO₂ Emission Unit in Polypropylene Sorbent Production

Process	Item	Fuel	CO ₂ Emission(kg) per 1kg of PP Product	CO ₂ Emission(kg) per 1kg of Material	Reference
Production (Material)	Propylene	—	0.768	0.768	propylene (0.768kg-CO ₂ /kg)
Processing	Propylene ↓ Polypropylene Fiber	Bunker A Oil	1.529	1.529	calculated from the value (polymerization: 2,860kcal/kg, fiberization: 2,290kcal/kg) of the manufacturer
		Total	2.30	calculated from the value (Bunker A Oil: 2.80kg-CO ₂ /L)	
		another Estimate	5.16	calculated from the value (0.703tC/million yen) of “synthetic fiber” in the “Inter-industry Relations Table” and price 2,000yen/kg	

Table 13 CO₂ Emission of Each Stage (Pattern 1)

(kg)

Pattern 1	Production of Sorbent	Transportation of Sorbent	Oil Recovery	Transportation for Disposal	Disposal	Total
Scenario A SBS-Bio.-Anaero.	361	67	141	486	4,684	5,739
Scenario B SBS-Bio.-Aero.	361	67	141	486	3,401	4,457
Scenario C SBS-Inci.	361	67	141	486	7,897	8,953
Scenario D PP-Inci.	1,757	67	141	486	10,421	12,872

3.2 製造・使用・運搬・処理段階のCO₂排出量の比較

パターン1における各段階のCO₂排出量をTable 13およびFig. 3に示す。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ることがわかる。

SBS (シナリオ A~C) に比し、ポリプロピレン製 (シナリオ D) は製造段階でのCO₂排出量が4倍以上となっているが、排出量全体から考えるとその差はさほど大きくはない。運搬段階の全体に占める量は少なく、今回の仮定である距離500kmを例えば1,000~2,000kmに変更しても、CO₂排出総量に大きく影響しないことがわかる。

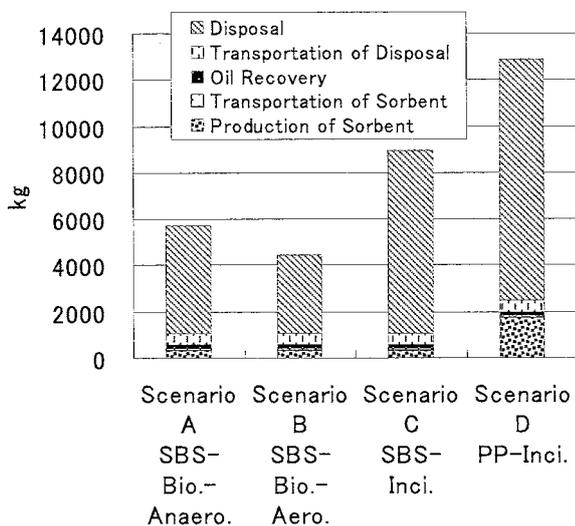
がわかる。また、好気処理 (シナリオ B) ではCH₄発生量が少ないため、嫌気処理 (シナリオ A) よりも温暖化への寄与は小さい。ただし、これは発生するCH₄を大気中に排出する場合であり、回収して燃料などに利用すれば嫌気処理は好気処理よりもCO₂排出量が少なく温暖化への寄与は小さくなる。

一方、同じ焼却処理での比較では、SBS (シナリオ C) はポリプロピレン製 (シナリオ D) に比してCO₂排出量は少ない。これは両者の炭素の比率の違いに由来する (Table 9~10)。

3.4 回収物組成 (パターン) の違いによるCO₂排出量の比較

パターン2および3のCO₂排出量をそれぞれTable 14およびTable 15に示す。また、パターン1~3の排出量比較をFig. 4に示す。パターン2即ち回収物の水切りを行って添加燃料を減じた場合には焼却処理のCO₂排出量が減少することがわかる。また、パターン3の理想的な回収においてはシナリオ間で大きな差異が見られない。これは、実際の油濁事故で油とともに必ず回収される海水が焼却処理の際のCO₂排出の大きな要因であり、また、回収海水が多く油分の割合が低くなるほど微生物分解処理が有利となることを示している。

杉樹皮製とポリプロピレン製で最も大きなCO₂排出量の差が出るのは、事故回収物の実測データを基にしたパターン1の組成の場合であり、「SBS-好気微生物処理 (シナリオ B)」と「ポリプロピレン製-焼却処理 (シナリオ D)」ではCO₂排出量の比は約1:3になる。また、現状の「ポリプロピレン製-焼却処理 (シナリオ D)」を「SBS-好気微生物処理 (シナリオ B)」に置き換えた場合、C重油1t回収あたり約8.3tのCO₂排出削減となる。

Fig. 3 CO₂ Emission of Oil Recovery with Sorbent

3.3 処理段階におけるシナリオ間のCO₂排出量の比較

Table 13およびFig. 3から同じSBS (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排出量が少ないこと

Table 14 CO₂ Emission of Each Stage (Pattern 2) (kg)

Pattern 1	Production of Sorbent	Transportation of Sorbent	Oil Recovery	Transportation for Disposal	Disposal	Total
Scenario A SBS-Bio.-Anaero.	363	68	141	486	4,684	5,742
Scenario B SBS-Bio.-Aero.	363	68	141	486	3,401	4,459
Scenario C SBS-Inci.	363	68	141	486	6,314	7,372
Scenario D PP-Inci.	1,767	68	141	486	8,852	11,314

Table 15 CO₂ Emission of Each Stage (Pattern 3) (kg)

Pattern 1	Production of Sorbent	Transportation of Sorbent	Oil Recovery	Transportation for Disposal	Disposal	Total
Scenario A SBS-Bio.-Anaero.	79	15	141	96	4,684	5,015
Scenario B SBS-Bio.-Aero.	79	15	141	96	3,401	3,732
Scenario C SBS-Inci.	79	15	141	96	3,322	3,653
Scenario D PP-Inci.	383	15	141	96	3,873	4,508

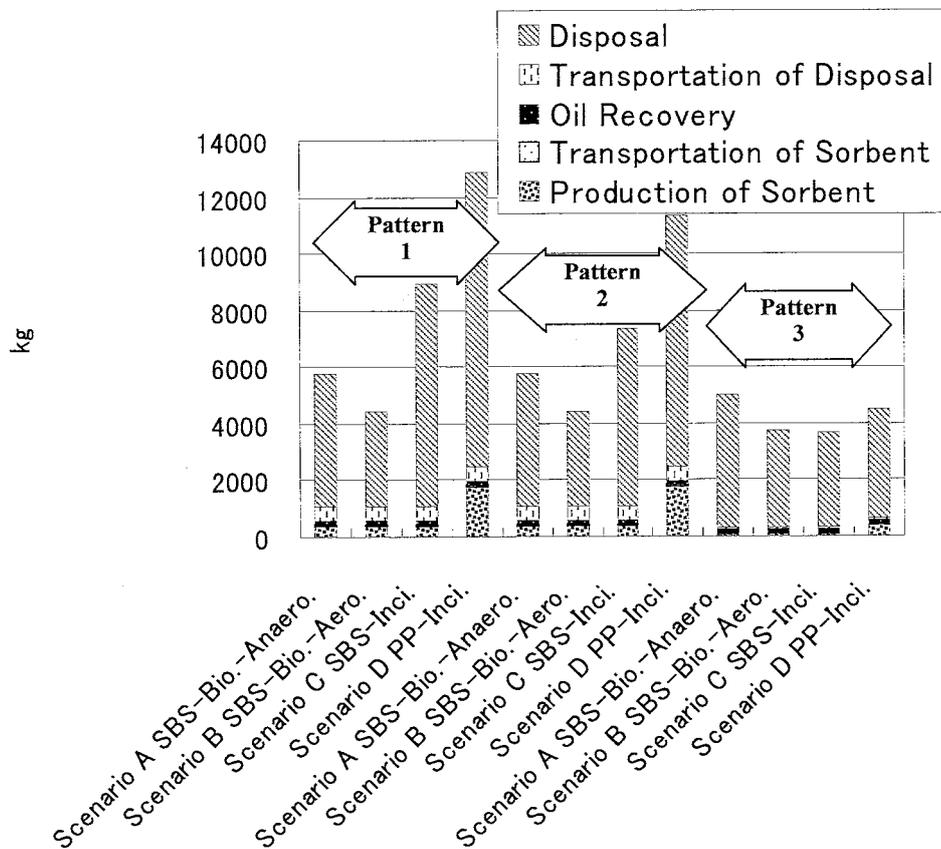


Fig. 4 CO₂ Emission of Each Pattern

4. 結 言

本研究にて以下のことが明らかになった。

- (1)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る。
- (2)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。
- (3)回収物における油分の割合が低いほど微生物分解処理がCO₂排出の面で有利になる。
- (4)SBSとポリプロピレン製油吸着材のCO₂排出量の比は最大約1:3になり、後者を前者に置き換えた場合、C重油1t回収あたり約8.3tのCO₂排出削減となる。

なお、今回のCO₂排出量の計算はSBSで行っているが、C₂H₄O組成が類似し、生分解性を有する油吸着材については同様の結果になると考えられる。バイオマス原料の油吸着材は、例えば木質系やコットン系のものが製品化されており、生分解性を有するものがほとんどである。

また、今回は検討しなかったものの、嫌気発酵で発生したメタンを放出せずに回収してバイオマス発電燃料などに活用する場合は、さらにCO₂排出量が削減可能であると考えられる。

一方、環境負荷においては他にも考慮すべき点がある。例えば、流出油の中に重金属類を含有している場合があり、食品ゴミ処理における重金属の健康影響の比較においては、焼却等による大気への重金属排出の影響は、コンポストの農地還元による土壌への重金属類排出に比べて軽微であるとの報告がある¹²⁾。すなわち、堆肥や土壌改良剤として農業土壌に排出された重金属は、野菜など食用植物を介して人に摂取される恐れがある。

こうしたことを配慮し、流出油の微生物分解処理により生じた分解生成物(堆肥)は、農業用ではなく、園芸用や緑化用に限定するなどある程度の制限を設けることを考慮しなければならない。また、園芸用や緑化用として利用する場合においても、同一エリアでの繰り返し使用には成分濃縮を考慮して慎重になるべきであると考えられる。

現在、CO₂排出が問題となっているのは主に、地球温暖化の観点からである。油濁事故対策の資機材である油吸着材は、防災用品という性質上、長期にわたって備蓄されることが多い製品である。全国の排出油防除資機材保有量の資料によれば、全国に合計1,018tの油吸着材が備蓄されている¹³⁾。量として多大なものではないが、これを杉樹皮製など生分解性のバイオマス製品に置き換えることは、炭素の固定すなわち地球温暖化抑制の面からも望ましいと言える。

なお、環境負荷評価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、結果の数値的な取り扱いには注意が必要であることを言及したい。

謝 辞

本研究に貴重な助言を頂いた東京大学・山口一教授、日本財団・山田吉彦氏に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 齊藤雅樹, 小倉秀 他 : 杉樹皮製油吸着材の開発と海洋流出油回収への適用(第1報), 日本造船学会論文集, 第190号, pp.287-294 (2001)
- 2) (独)海上災害防止センター: 杉樹皮製油吸着材の有効利用及び微生物分解処理技術に関する調査研究報告書 II, 第5章 (2005)
- 3) 齊藤雅樹, 小倉秀 他 : 杉樹皮製油吸着材の微生物分解処理技術に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第2号, pp.9-18 (2005)
- 4) 南齋規介 他 ((独)国立環境研究所 他) : 産業関連表による環境負荷原単位データブック-LCAのインベントリデータとして-(2002)
- 5) 内藤林 他 (ナホトカ号の事故に関する調査研究会) : ナホトカ号の事故に関する調査研究報告書, pp.54-55 (1998)
- 6) (社)プラスチック処理促進協会: 石油化学製品のLCIデータ調査報告書, pp.99 (1999)
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, (社)産業環境管理協会, (社)科学工業会: 化学工業製品におけるトータル・エコバランスの分析手法に関する調査(II), 平成6年度調査報告書 NEDO-GET9410-1 (1995)
- 8) 総合資源エネルギー調査会石油分科会石油部会燃料政策小委員会: Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, バイオマス燃料のCO₂排出等に関するLCA評価について, 同委員会第9回資料 (2003)
- 9) 奈良県林業試験場: 木材加工技術ハンドブック, pp.342-343 (1991)
- 10) 環境省: 平成14年度温室効果ガス排出量算定方法検討会 (2002)
- 11) 佐野寛: エネルギー資源としてのバイオマス評価の視点, バイオマスハンドブック, pp.311-323 (2002)
- 12) 平井康弘 他: 食品残渣の循環処理過程におけるライフサイクルアセスメント, 農林水産業にかかるLCA応用

施策の検討調査委託事業報告書（平成12年度），農林
水産省大臣官房（2001）

- 13) 海上保安庁：ナホトカ号海難・流出油事故の概要と今後の課題，石油連盟 油流出に関する国際シンポジウム（1997）
-