

最終処分場の安定度判定に関する研究

—観測井を用いた安定度判定—

福井 博, 坂本広美, 高橋通正, 山田正人*, 遠藤和人*
(調査研究部, *国立環境研究所)

Research on the stabilization to judge the abolition of the landfill site

Hiroshi FUKUI, Hiromi SAKAMOTO, Michimasa TAKAHASHI, Masato YAMADA* and Kazuto ENDO*
(Research Division, National Institute for Environmental Studies*)

キーワード: 最終処分場, 安定化, 浸出水, 保有水

1 はじめに

最終処分場の廃止にあたっては、「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令(昭和52年3月14日総・厚令1)」(基準省令)により浸出水、ガス等に廃止基準が示されているが、実際にこの基準を適用するために必要なモニタリング手法については検討の余地が多々残されており、最終処分場の安定化状況を適切に把握する方法と指標が求められている。

そこで、本研究では、閉鎖後、長期間経過した産業廃棄物最終処分場において、従来から最終処分場の安定化指標に用いられている浸出水の水質を測定し、安定化を把握するとともに、埋立地内で埋立時期が新しい廃棄物層を掘削して観測井を設け、掘削した廃棄物の溶出試験及び観測井内の保有水の水質、孔内ガス組成、地表面のメタン濃度等の測定を行い、最終処分場の特定の場所における安定化状況について把握した。

また、廃プラスチック類を主に埋め立てた最終処分場においても安定化の指標に浸出水のBOD、COD、塩化物イオン等が用いられるが、これらの項目が示す安定化は、廃プラスチック類に付着した有機物や他の廃棄物等に由来するため、廃プラスチック類そのものの変化を表す指標が必要と考えられる。今回、廃プラスチック類から水に溶出するビスフェノールA(BPA)に着目し、浸出水中のBPA濃度、BPA排出量及びボーリングにより掘削した廃プラスチック

類から溶出するBPA量等を溶出試験により把握したので、その結果を併せて報告する。

2 方法

2.1 調査対象最終処分場

観測井を設置した最終処分場は管理型産業廃棄物処分場で、埋立地面積27,000m²、埋立容量100,000m³、埋立期間は昭和49年～60年(第1期:昭和49-51年、第2期:昭和51-56年、第3期:昭和56-60年)であり、閉鎖後24年経過している。埋立地は谷戸に作られ、上部から第1,2,3期と下部に向かって埋め立てられた。遮水工は第3期のみ施工され、底面が粘土、法面が合成ゴムシートである。現在、最終覆土表面には雑草が繁茂し、荒地となっている。昭和57年度受け入れ実績より算出した埋立物の容量率は、廃プラスチック類87%、建設廃材8%、燃えがら3.4%、その他1.6%(ガラス陶磁器、木くず、紙くず、ゴムくず、繊維くず)である。

2.2 ボーリング掘削と観測井の設置

埋立時期が最も新しい第3期埋立地において、地表面メタンフラックス分布調査(国立環境研究所)及び電気探査(千葉県環境研究所:比抵抗探査)¹⁾を行った後、廃棄物層が最も厚い場所にボーリングによる掘削を行い、観測井を設置した(国立環境研究所:平成17年2月設置、掘削深度10GLm、ストレーナ深度-2.5～-9.5GLm、孔内温度、ガス圧、ガス組成等の自動測定装置付き)。

2. 3 保有水、浸出水の採取

観測井内の保有水の採取には、内径4cm、長さ91cmのポリエチレン製ベイラーサンプラーを使用し、観測井底部に溜まった保有水を平成17年5月から平成20年7月まで採取した。観測井の洗浄は、保有水採取の数日前に行い、4Lの水道水を上部から入れて汲み上げる操作を5回繰り返す、底部の沈殿物を除去した。保有水の採取と同時に浸出水も採取した。なお、当処分場の浸出水は第1、2、3期埋立地の浸出水が混合したものであり、個々には採取できない構造となっている。浸出水水質の過去の推移については昭和56年から現在まで行っている分析結果を用いた。

2. 4 分析項目

酸化還元電位（ORP）は、試料採取時に現地にて測定した。BOD、COD、塩化物イオン、全窒素、金属等については工場排水試験方法（JIS K 0102）に従った。BPAは環境庁のマニュアル²⁾に準じた。

2. 5 BOD、COD、BPA年間排出量の算出

浸出水のCOD、BOD、BPAの排出量の算出には、平成15年6月から17年6月まで毎週1回、豪雨に相当する大雨があった平成15年8月15日、平成16年10月9日、同10月20日（各24時間降水量は、それぞれ202mm、183mm、168mm、各48時間降水量は、それぞれ274mm、267mm、204mm）には、降雨後1～2週間、頻度を上げて行った浸出水の水量測定と分析結果を用いた³⁾。年間排出量は、測定日の浸出水量とBOD、COD、BPAの各濃度を乗じて1日分の排出量を計算し、次の測定日まで同じ浸出水量と濃度が続くと仮定し、合計して求めた。

2. 6 溶出試験

ボーリングにより掘削した廃棄物を室温にて風乾し、廃プラスチック類を選別した。廃プラスチック類に付着している泥を落とし、量の多い順に22種類に分け、種類別にはさみで1cm角に切断した。切断試料（22種類）各10gに純水を100mL加え、20℃で24時間静置し、上澄み液をBPAの分析に供した。また、廃プラスチック類が埋め立てられた後、廃プラスチック類

からBPAが流出しBPA含有量が減少した場合、廃プラスチック類から水へ溶出するBPA量も減少するか否かを調べるため、2×2.5cmに切断したシート状の塩化ビニル製品をエタノール20mLに一定時間（1～120時間）漬け、BPA含有量を減少させた後、エタノールを取り除き、水20mLを加えて24時間静置し、水へ溶出するBPA量を測定した。

3 結果

3. 1 ボーリング掘削調査

埋立時期が最も新しい第3期埋立地の廃棄物層をボーリングにより地表面下10mまで掘削し、廃棄物を採取したところ、主な廃棄物はシート状、フィルム状の廃プラスチック類であった。風乾した試料の一部を図1に示す。



図1 風乾試料

3. 2 ボーリング掘削時のガス調査

ボーリング掘削時にガス分析を行ったところ、高密度の低い廃プラ層では酸素濃度が高く、泥土層、シート状廃プラ層と最下部の還元環境が相対的に強い保有水層では（メタン/二酸化炭素）比が高い傾向が認められた。最下部のメタン濃度は40%近くの高濃度を示した。メタン/二酸化炭素比が高い領域は、保有水層を伴い、二酸化炭素が水に吸収された結果と考えられ、（メタン/二酸化炭素）比は保有水の位置の推定に有効な指標になり得る。

3. 3 メタンフラックス調査

第3期埋立地において、ボーリングの前に静置型閉鎖式チャンバー法⁴⁾により地表面メタンフラックス分布調査を行った結果、図2の通り

メタンは埋立地の法面にあたる部分から多く放出されているのが確認された。メタンの地表面総放出量は 380mg / 時間 (9.2g/日 = 3400g/年) であった。

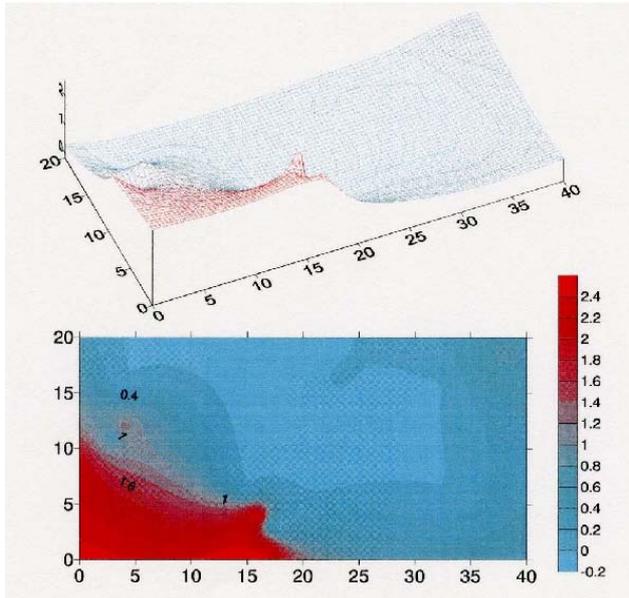


図2 地表面メタンフラックスの等値線図

3. 4 発生ガスの自動測定

メタンの自動測定の結果、図3に示す通りメタン濃度が10%前後で時間変動していることが明らかになった。気温が低くなるとガス圧が増加し、冬季にメタン濃度が高くなることが示唆され、第2期埋立地において手動で行ったガス抜き管における測定で得られたメタン濃度の季節変動³⁾が裏付けられた。また、ガス組成の自動測定により従来測定不能であった微量なメタン、二酸化炭素発生量の測定が可能となった⁵⁾。

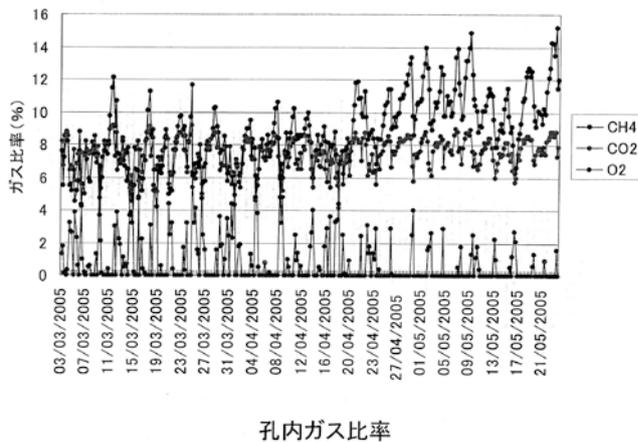


図3 メタン濃度の自動測定

3. 5 保有水と浸出水の水質

観測井設置後の保有水と浸出水の BOD, COD, 全窒素濃度の推移を図4~6に示す。観測井内の保有水の BOD, COD 濃度は測定開始後、急速に低下する傾向がみられたものの、依然として浸出水よりも高い状態が続いており、観測井を設置した場所における有機物の分解レベルが、浸出水で示される埋立地の全体レベルと比べ、遅れていることが確認された。観測井設置時に

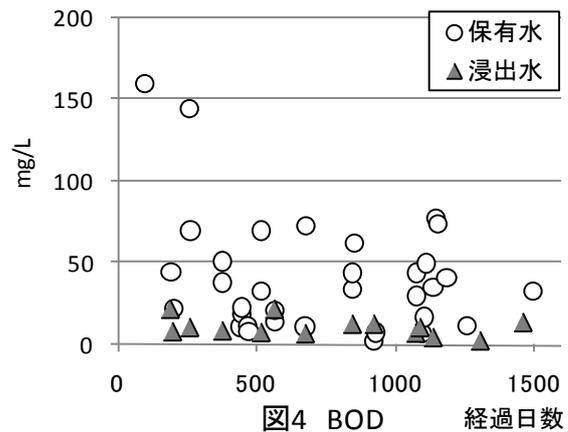


図4 BOD 経過日数

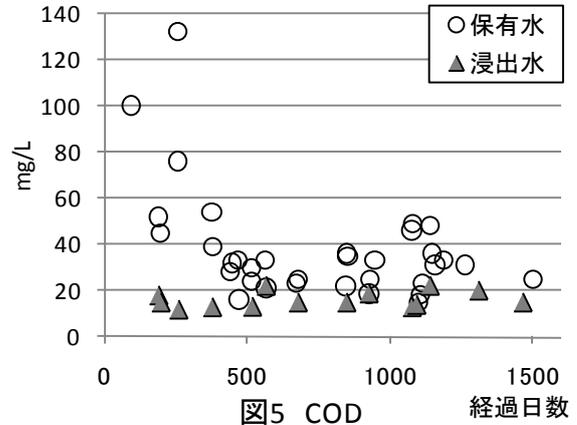


図5 COD 経過日数

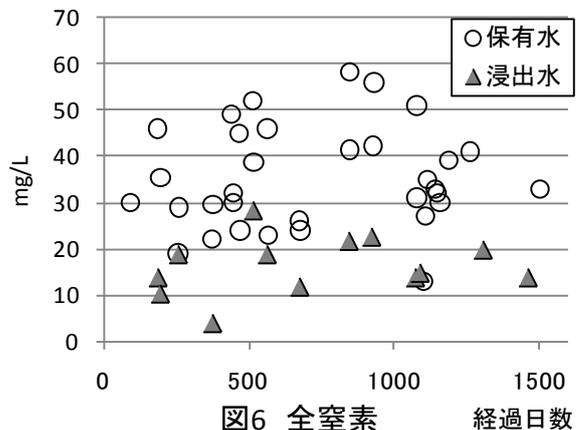


図6 全窒素 経過日数

は、掘削等により空気が入り込み、観測井周辺の廃棄物層の有機物の分解が一時的に進んだと考えられる。その後、観測井の上端に蓋をしたが、保有水の採取時や観測井の洗浄時に空気が入り込み、観測井周囲の廃棄物層が好気的な雰囲気となり、有機物の分解が進んでいると考えられる。保有水の酸化還元電位は600日目の時点で+150mVであり、浸出水の-43mVよりも酸化状態を示し、保有水に含まれる溶解性鉄が酸化されて底部に沈殿しているのが確認された。全窒素の濃度は浸出水よりも高いままで、測定期間中に低下傾向がみられなかった。

保有水と浸出水の塩化物イオン、ナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウム濃度を図7~11に示す。保有水の塩化物イオン、ナトリウム、カルシウム、マグネシウム濃度はBOD、COD、全窒素濃度と比べ、浸出水との濃度差が小さく、BOD、CODのような顕著な低下傾向が認められなかった。なお、保有水のナトリウム濃度は他の無機物と異なり、浸出水よりも高い値を示した。測定期間中の保有水と浸出水の塩化物イオン、マグネシウム、カルシウム、カリウ

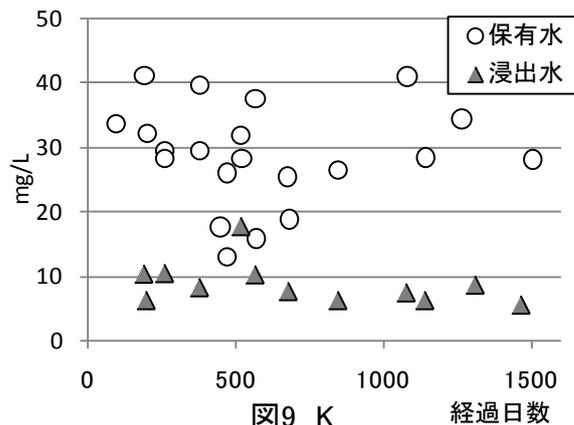


図9 K 経過日数

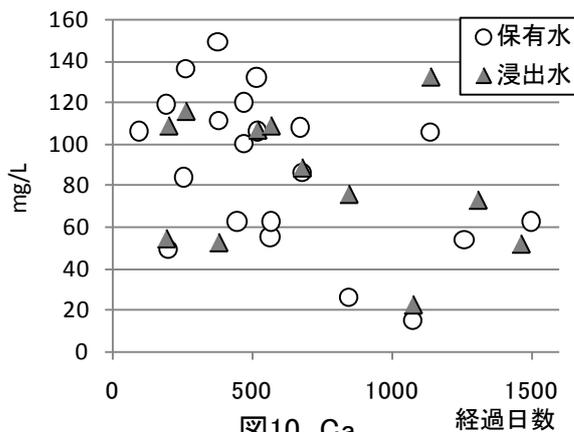


図10 Ca 経過日数

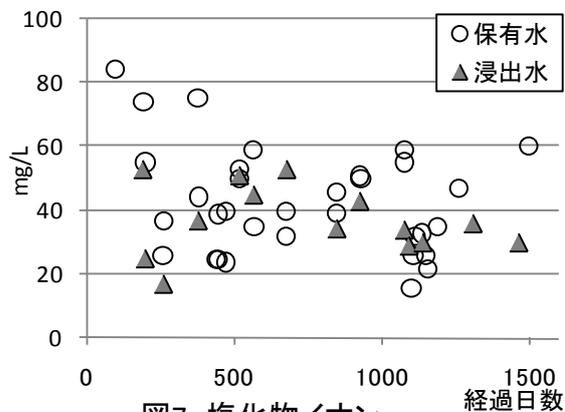


図7 塩化物イオン 経過日数

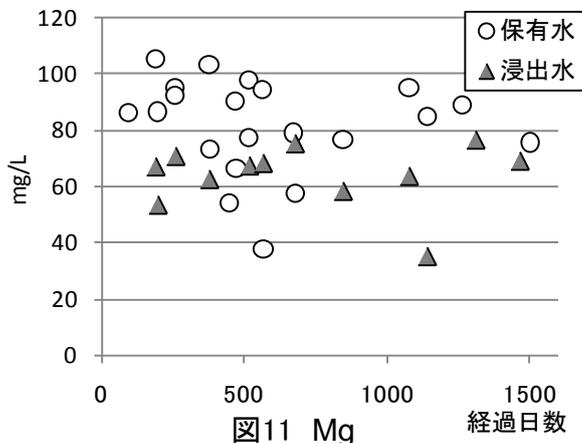


図11 Mg 経過日数

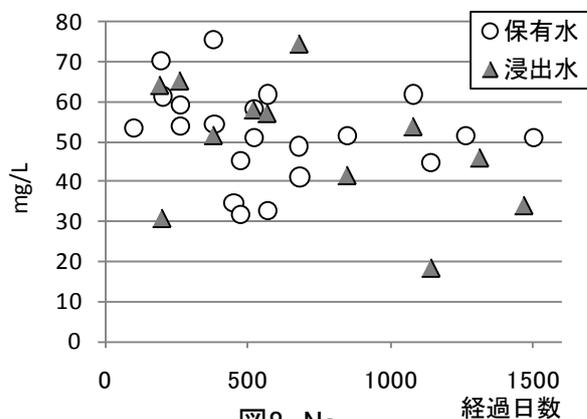


図8 Na 経過日数

ム、ナトリウムの濃度比を図12に示す。浸出水のナトリウムの割合がやや少ないものの、ほぼ同様な濃度比であった。本処分場のように廃プラスチック類を主体に埋め立てた処分場では、焼却灰を埋め立てた処分場と異なり、塩化物イオン等の無機物の濃度が低く、その洗い出しは速やかで、埋立初期に流出したものと考えられる。

また、保有水のBOD、COD等の濃度レベルが、埋立当初から現在までの浸出水のどの年

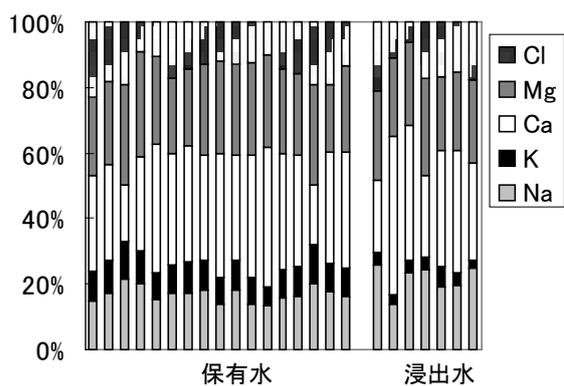


図12 保有水と浸出水の濃度比

代に相当するかを調べるため、保有水の水質と過去から現在に至る浸出水の水質を図13～16に示す。図中の年数は浸出水分析を始めた第3期埋立開始年の昭和56年を0年としている。保有水を採取している区画は、埋立時期が昭和56～60年で、第1期よりも6～11年遅く埋め立てられた。そのため、保有水の水質は浸出水の濃度レベルよりも埋立が遅れた分高いと推測したがBOD、COD、全窒素濃度がそれ以上に高かった。特に、保有水の

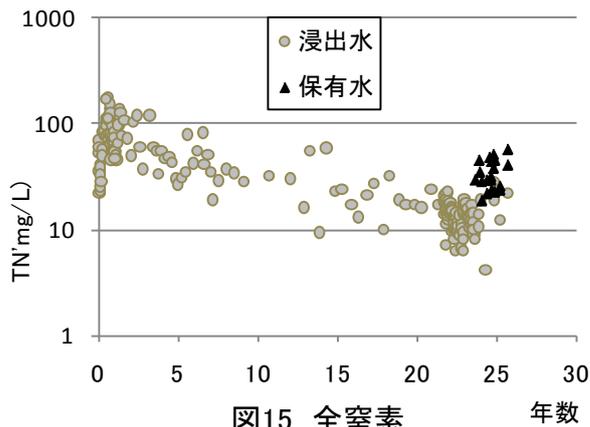


図15 全窒素

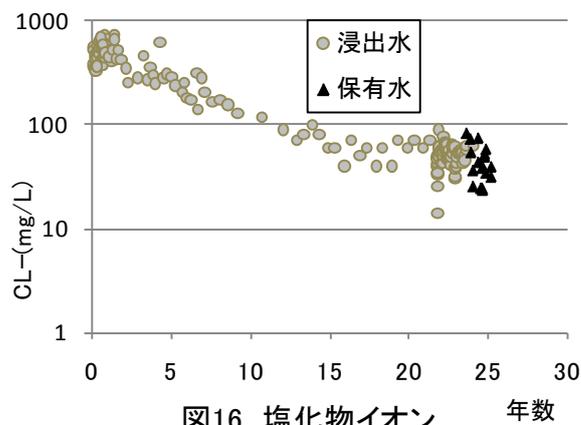


図16 塩化物イオン

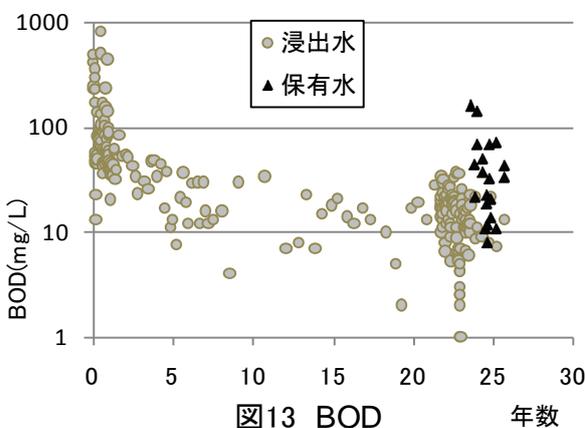


図13 BOD

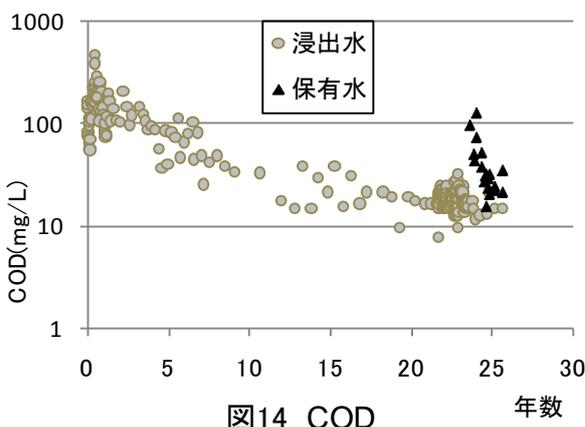


図14 COD

BOD濃度は埋立が遅れた分よりさらに前の第3期埋立開始1～2年後の値を示した。COD、全窒素濃度も同様な傾向を示した。なお、保有水のBOD、COD濃度の減少傾向は、浸出水と比べ速やかであった。一方、保有水の塩化物イオンはBOD、COD濃度と異なり、埋立時期の遅れにもかかわらず、浸出水と同じレベルであった。

浸出水の金属等については最終覆土終了後の昭和62年～平成20年及び揮発性有機化合物については、平成13年から8年間、平均年2回測定してきたが、すべて表1に示す値を下回り、これらの項目を安定化の指標として用いることができなかった。

なお、浸出水の溶解性鉄濃度は、平成15年6月から17年6月まで行った毎週1回の測定では、ほぼ15～20mg/Lの範囲にあり、低下する傾向がみられなかった。降水量が少ない時期になると、浸出水が発生なくなり、マンホールに溜まった状態が続くため、溶解性鉄が水面付近で酸化沈殿し、マンホール内の浸出水の溶解性鉄濃度は2.4mg/Lまで低下した。また、観測井の

保有水の溶解性鉄は 5.1~33mg/L(平均 17mg/L, n=16) であり, 浸出水と同様な値であった。このように, 浸出水の溶解性鉄濃度が長期間にわたり減少傾向がなく, 埋立時期が遅い地点の保有水と浸出水の濃度がほぼ同じであることから, 埋立地から排出される溶解性鉄は, 埋め立てられた廃棄物以外にも中間覆土等の土壌由来が大きいと考えられる。

表 1 浸出水の金属等の濃度

アルキル水銀	(mg/l)	<0.0005
総水銀	(mg/l)	<0.0005
カドミウム	(mg/l)	<0.01
鉛	(mg/l)	<0.01
有機りん	(mg/l)	<0.1
六価クロム	(mg/l)	<0.05
ヒ素	(mg/l)	<0.005
シアン	(mg/l)	<0.1
PCB	(mg/l)	<0.0005
トリクロロエチレン	(mg/l)	<0.002
テトラクロロエチレン	(mg/l)	<0.0005
ジクロロメタン	(mg/l)	<0.002
四塩化炭素	(mg/l)	<0.0002
1,2-ジクロロエタン	(mg/l)	<0.0004
1,1-ジクロロエチレン	(mg/l)	<0.002
cis-1,2-ジクロロエチレン	(mg/l)	<0.004
1,1,1-トリクロロエタン	(mg/l)	<0.0005
1,1,2-トリクロロエタン	(mg/l)	<0.0006
1,3-ジクロロプロパン	(mg/l)	<0.0002
ベンゼン	(mg/l)	<0.001
セレン	(mg/l)	<0.002
フェノール類	(mg/l)	<0.5
銅	(mg/l)	<0.05
亜鉛	(mg/l)	<0.05
クロム	(mg/l)	<0.05
ニッケル	(mg/l)	<0.05

溶解性マンガン濃度は平成 15 年 6 月から 17 年 6 月まで行った毎週 1 回の測定では 0.2~0.35mg/L(平均 0.255mg/L:n=109) の範囲にあった。保有水の溶解性マンガン濃度は 0.17~1.2mg/L(平均 0.75mg/L:n=16) であり, 平均値では浸出水より高かった。

3. 6 浸出水の BOD, COD 年間排出量

平成 15 年 6 月から平成 17 年 6 月までの週 1 回測定における BOD 年間排出量は, 平成 15 年 6 月から平成 16 年 5 月(1 年目)までに 440kg, 平成 16 年 6 月から平成 17 年 6 月(2 年目)までに 208kg であり, 2 年目の方が低かった。ま

た, 浸出水の COD の年間総排出量は, 1 年目 433kg, 2 年目 451kg で大差がなく, 横ばいであった。当処分場のように閉鎖後長期間が経過した所では, BOD, COD の濃度変動よりも浸出水量の変動の方が大きいため, BOD, COD の排出量は浸出水量の影響を強く受ける。そのため, 年間排出量を比べる際には, 降水量の違いを考慮しなければならない。降水量は 1 年目が 1704mm, 2 年目が 1975mm であり, 2 年目の方が降水量が多かったことを考慮すると, COD, BOD で表される有機物の安定化は収束の方向に向かっていると推測された。

この処分場では, 浸出水の BOD, COD の由来は, 廃プラスチック類に伴って持ち込まれた有機物や廃プラスチック類以外の廃棄物と考えられる。廃プラスチック類自体から溶出する有機化合物濃度は BOD, COD に比べて低く, BOD, COD の値に反映されない物質もある。従って, 廃プラスチック類そのものの安定化を浸出水の BOD, COD で把握することは困難と思われる。

3. 7 浸出水の BPA 年間排出量

平成 15 年 6 月から平成 17 年 6 月までの週 1 回測定における BPA 濃度の推移は図 17 に示すように, 濃度が上がっていく傾向が認められた。BPA 濃度は平成 7 年 7 月が 29 μ g/L, 平成 15 年 7 月が 20 μ g/L であり, ほぼ同じレベルであったが, 平成 16 年 7 月には 110 μ g/L に上がっている。浸出水量と BPA 濃度との関係をみると, 浸出水量が少ない時に濃度が高くなる傾向がみられた。その理由としては, この最終処分場の構造上, 底部から約 2.5m までの廃棄物が浸出水に浸かっていることが考えられる。

塩化ビニル製品に含まれる BPA の水への溶出試験の結果から⁶⁾, BPA の溶出は一定量の水の中で上限の濃度に達するが, その後も水を取り替えるたびに同じ上限の濃度に達し, 溶出し続けることが明らかにされている。従って, 廃棄物が浸出水に浸かった状態にある底部の廃棄物層では, 上からの水の供給がなくなると, BPA の濃度が上限の濃度まで上がると考えられる。また, 水の供給が 1 か月間ない場合は, 上限の濃度を保持していることが確認された(平成 15 年 3 月)。

1 日当たりの BPA 排出量の推移を図 18 に示す。排出量の変動は 0.3~118g/日と大きく, 浸

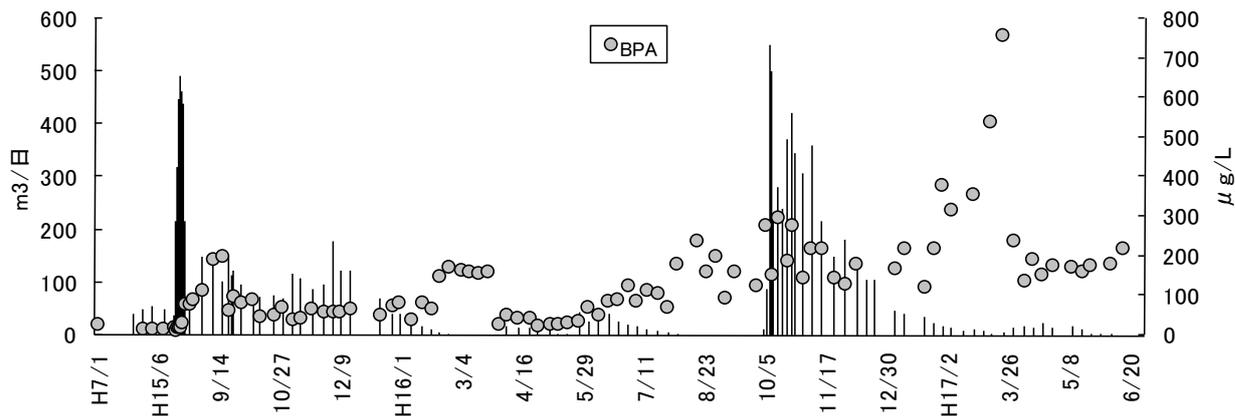


図17 浸出水量とBPA濃度

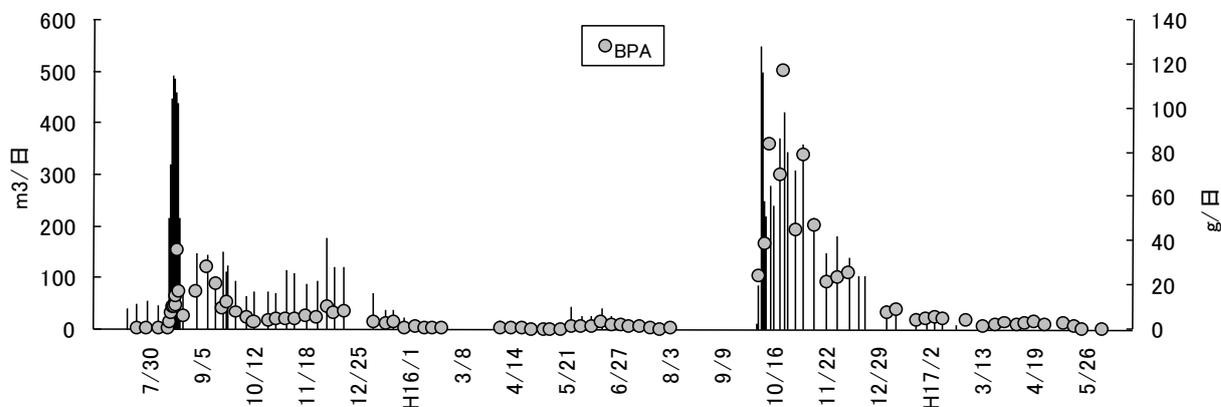


図18 浸出水量とビスフェノールA排出量

出水量が大雨で急増した後に排出量が高くなっている。調査期間中には、豪雨が平成 15 年 8 月と平成 16 年 10 月にあったが、10 月には豪雨が 2 回続いたため、浸出水量の急激な増加が 2 か月間続き、その間の BPA 濃度も高かったため、BPA 排出量は 10 月の豪雨の方が多かった。平成 16 年 3 月の 1 か月間と平成 16 年 8～9 月の 1.5 か月間に BPA が排出されていないのは、浸出水がまったく流出しなかったためである。

また、浸出水の BPA の年間総排出量は 1 年目 1.5kg、2 年目 4.9kg であり、2 年目の方が多かった。その理由は、前述のとおり豪雨による浸出水量の違いによるものと思われるが、BOD、COD で表される有機物の安定化が収束の方向に向かっているのに対し、廃プラスチック類の安定化は遅れていると考えられる。

3. 8 溶出試験による BPA 溶出量

第 3 期埋立地からボーリングにより掘削採取した廃プラスチック類の溶出試験の結果は表 2

の通りであり、23～27 年前に埋め立てられた廃プラスチック類から BPA が現在も溶出することが確認された。22 種類の試料のうち、BPA の溶出がみられたのは半数の 11 種類であった。そのうちの 7 種類が塩化ビニルであり、そのほとんどがシート状の廃プラスチック類であった。BPA が溶出した廃プラスチックの BPA 溶出量は 0.12～21 μg/g であり幅があった。また、溶出液の BPA 濃度は 12～2100 μg/L であり、浸出水の BPA 濃度と同程度の値を示すものがあった。

埋立当時の昭和 50 年代には、BPA がフタル酸エステルで可塑化された塩化ビニルの安定剤として使用されていたため、浸出水中の BPA は軟質の塩化ビニル製品から溶出したものが含まれていると考えられる。今回、BPA の溶出量が多かった塩化ビニル製のシート類の中には柔軟性が失われているものもみられた。

BPA が水へ溶出する廃プラスチック類は埋立後長期間が経過すると、BPA の含有量が減少し、

水への BPA 溶出量も変化すると考えられる。そこで、BPA を含む軟質のシート状塩化ビニル製品を用いて溶出実験を行った。エタノールにより製品から BPA を抽出し、BPA を減少させた後、水による溶出試験を行った。

エタノール抽出時間と抽出された BPA 量は図 19 に示す通りであった。次にエタノール抽出により BPA 含有量の減少したシート状塩化ビニル製品に対し、水による溶出試験を行ったところ、図 20 に示すようにエタノールで BPA が多く抽出された製品ほど水への溶出量が減少した。このような製品が埋め立てられた場合、浸出水中の BPA 濃度が安定化指標のひとつになると考えられる。

表 2 掘削した廃棄物の BPA 溶出量

No.	材質	溶出液の BPA 濃度 ($\mu\text{g/L}$)	BPA 溶出量 ($\mu\text{g/g}$)
1	シート硬(PVC)	2100	21
2	シート厚手	870	8.7
3	シート硬(PVC)	730	7.3
4	シート硬(PVC)	560	5.6
5	シート軟(PVC)	230	2.3
6	シート硬(PVC)	120	1.2
7	シート薄手	63	0.63
8	フィルム(PVC)	38	0.38
9	フィルム	18	0.18
10	フィルム	15	0.15
11	シート軟(PVC)	12	0.12
12	フィルム	<1	<0.01
13	布状	<1	<0.01
14	布状	<1	<0.01
15	布状	<1	<0.01
16	フィルム	<1	<0.01
17	シート薄手	<1	<0.01
18	フィルム	<1	<0.01
19	フィルム	<1	<0.01
20	フィルム	<1	<0.01
21	袋	<1	<0.01
22	フィルム	<1	<0.01

4 まとめ

昭和 49~60 年に埋め立てられた管理型産業廃棄物最終処分場（廃プラスチック類 87%）において、最も新しい第 3 期埋立区画に観測井を設置し、観測井内の保有水、ガス及び浸出水による安定化モニタリングを行って得られた結果は次の通りであった。

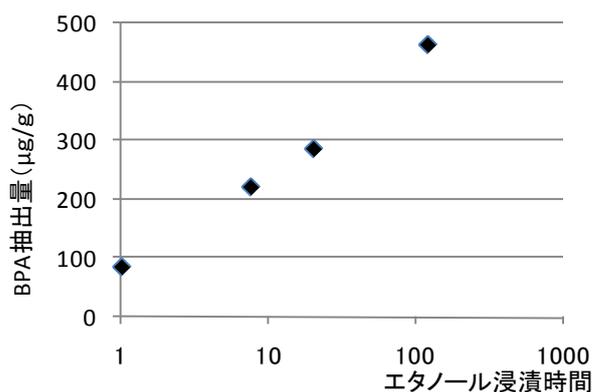


図 19 エタノールによる BPA 抽出量

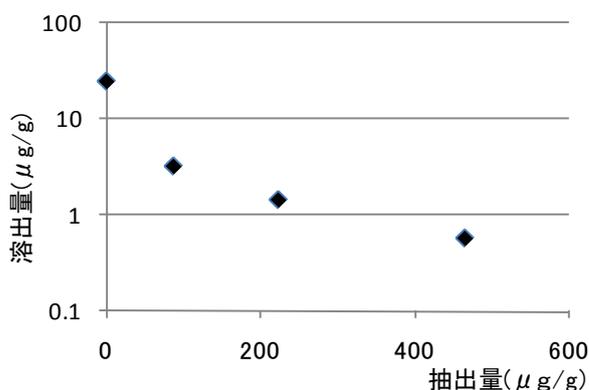


図 20 BPA 含有量と水への溶出量

観測井を設置した地点では、高濃度のメタンが検出され、保有水の BOD, COD 濃度は現在の浸出水よりも高く、第 3 期埋立開始から 1~2 年頃の浸出水と同じレベルを示した。浸出水の BOD, COD 年間排出量からみると、処分場全体では安定化に向かっているが、未だに有機物の分解が進んでいない部分が存在することが観測井を用いたモニタリングで明らかとなった。

観測井の保有水の BOD, COD 濃度が急速に低下したのは、観測井に接する廃棄物層が好気性雰囲気となり、有機物の分解が促進されたためと考えられる。保有水のナトリウム等の無機元素濃度と組成比は、現在の浸出水と大差なかった。廃プラスチック類を主体に埋め立てた処分場では、焼却灰を埋め立てた処分場と異なり、浸出水の塩化物イオン等の無機物の濃度が低く、洗い出しが速やかで、埋立初期に流出したと考えられる。

観測井に設置した自動測定装置による連続モニタリングについては、ソーラー発電と各種データロガーを使用することにより、年に数回のデータ収集で、廃棄物層温度、ガス圧、ガス組

成等を連続的に測定できた。今後の安定化モニタリング手法として、有効な方法であることを確認した。

廃プラスチック類を主体に埋め立てた最終処分場の安定化を把握する指標としては、浸出水の BOD,COD 濃度の推移に加え、BPA が廃プラスチック類自体の変化を把握する指標のひとつとして有効であることを確認した。

参考文献

- 1) 福井 博ほか：廃棄物埋立層物性値における現位置測定手法の検討，神奈川県環境科学センター研究報告，第 30 号，78-79 (2007)
- 2) 環境庁水質保全局水質管理課：外因性内分泌攪乱化学物質調査暫定マニュアル（水質，底質，水生生物）(1998)
- 3) 福井 博ほか：最終処分場の廃止に向けた安定度判定に関する研究，神奈川県環境科学センター研究報告，第 29 号，pp.80-89(2006)
- 4) 石垣智基ほか：最終処分場地表面からの埋立地ガス放出挙動の原位置評価手法の開発，第 16 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，1004-1006 (2005)
- 5) 山田正人ほか：場内観測井を用いた最終処分場の安定化モニタリング，都市清掃，Vol.60，pp.253-256 (2007)
- 6) 坂本広美ほか：最終処分場浸出水から検出されるビスフェノール A とその起源に関する研究，廃棄物学会論文誌，Vol.15，pp.511-520 (2004)