

<報 文>

レーダーチャートによる水質特性評価手法を用いた 廃棄物最終処分場の状態把握*

—ある安定型廃棄物最終処分場を例として—

古賀智子**・平川周作**・鳥羽峰樹**

キーワード ①水質特性評価 ②レーダーチャート ③廃棄物最終処分場 ④硫化水素 (H₂S)

要 旨

有機物指標と無機イオン成分を用いたレーダーチャートによる水質特性評価手法を、高濃度の硫化水素 (H₂S) が発生したことのある安定型廃棄物最終処分場に適用した。浸透水は 1999 年 11 月から 2016 年 12 月、H₂S は 2000 年 10 月から 2016 年 12 月までの毎月のモニタリングデータを用いた。レーダーチャートは、有機物指標 3 項目 (化学的酸素要求量, 生物化学的酸素要求量 (BOD), 全有機炭素), 無機イオン成分等 6 項目 (電気伝導率, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻) で構成されており, 測定値を稼働中の最終処分場関連水 (n = 124) の平均値で除することによって標準化した値を用いて作成した。レーダーチャートと H₂S 濃度の変化を比較したところ, 易分解性有機物の指標である BOD の増加と H₂S の発生に関連があることが示唆された。モニタリングデータからレーダーチャートを作成することで経時的な水質の変化を視覚的に捉えることができ, H₂S 発生の防止といった廃棄物最終処分場の維持管理における手段として利用できる可能性が示唆された。

1. はじめに

廃棄物最終処分場 (処分場) において, 浸出水の水質悪化や有害ガスの発生などの問題が生じることを未然に防ぐために, 埋立地内部の状態を把握することは非常に重要である。そのため, 処分場では定期的にモニタリング調査を実施していることが多い。よく実施されるものは, 浸透水や保有水および周辺の観測井戸における水質検査, ガス抜き管からのガス発生調査及び埋立地内部温度測定調査などである¹⁾。これらの調査から得られた個々のデータを総合的に判断することによって, 埋立地内部の状態把握が行われている。しかし, 埋立地の維持管理の適切さを判断するためにモニタリングデータをどのように処理し解釈すべきかについて, 具体的な手法などは定められていない。

そのため, モニタリングデータを用いた処分場の評価手法や, 事故の予防に寄与するデータ解析手法の開発が試みられている。これまでに, 浸透水及び処分場内ガスの長期モニタリングデータに基づき, 浸透水に含まれる無機イオン成分濃度, 標準酸化還元電位及び溶存酸素濃度を用いて, 処分場からの H₂S 発生を予測するモデル式が作成されている²⁾。また, 複数の処分場から採取した浸出水の水質データについて, 相関分析や主成分分析を行

うことによって処分場をいくつかのグループに類型化できる可能性を示し, また, 特定の処分場において, 簡易に計測できる電気伝導率 (EC) を用いて浸出水中の鉛の高濃度出現が予測できる可能性を示唆した報告がある³⁾。

我々の研究グループは, 処分場内外の水試料の測定結果を用いて, 水質特性を評価する手法を開発した⁴⁾。水質のデータを個別に捉えるのではなく, 化学的酸素要求量 (COD) などの有機物指標と硫酸イオン (SO₄²⁻) などの無機イオン成分をレーダーチャートで表現することによって, 水質の特性を複合的かつ視覚的に把握するものである。この手法の応用として, 浸透水のレーダーチャートを作成し, 有機物指標と無機イオン成分のバランスを確認することによって, H₂S 発生を未然に防げる可能性がある。福岡県内では過去に, 安定型廃棄物最終処分場において高濃度の H₂S による死亡事故が発生している⁵⁾⁻⁶⁾。H₂S の発生は, 主に安定型廃棄物最終処分場で問題となっており, 2006 年まで埋立てが許可されていた廃石膏ボードが原因として挙げられている⁷⁾。H₂S は 50 ppm を超えると, 人体に対して急性で生命の危険を伴いかねない毒性があるといわれているため⁸⁾, 処分場において H₂S 発生を未然に防止することは極めて重要である。そこで本研究では, 平川らが開発した水質特性評価手法をこの

*Grasping waste landfill state with water characterization method by radar chart

**Tomoko KOGA, Shusaku HIRAKAWA, Mineki TOBA (福岡県保健環境研究所)

処分場の長期モニタリングデータに適用し、水質特性の変化と H₂S 発生の関係を調査することにより、埋立地内の状態把握への適用可能性を検討した。

2. 調査方法

2.1 安定型産業廃棄物最終処分場の概要

対象とした安定型産業廃棄物最終処分場は、敷地面積 39,461 m²、埋立容量 787,899 m³であり、1989 年から埋立てを開始した。1999 年 10 月に高濃度の H₂S による従業員の死亡事故が発生し、その後のボーリング調査で一部のボーリング孔内から最高 15,000 ppm の H₂S が検出されている。事故発生後、福岡県は直ちに原因調査や周辺環境への影響調査を実施し、2000 年 10 月からは定期的なモニタリングを開始した。当該廃棄物最終処分場は、2005 年 4 月に産業廃棄物の埋立てを停止し、現在に至っている。

解析に用いたデータのモニタリング期間は、H₂S は 2000 年 10 月から 2016 年 12 月、浸透水は 1999 年 11 月から 2016 年 12 月までであり、頻度は月 1 回である。モニタリング期間中、H₂S については埋立地内のボーリング管 B-1、B-2、B-3 及びガス抜き管 G-1、G-2、G-3 の計 6 地点で採取した。各地点の深度及び調査期間は表 1 のとおりである。浸透水については、この埋立地全体を流れてきた水を浸透水採取設備で採取した。

表1 ガス調査地点

| ガス調査地点 | 深度 (m) | 調査期間 |
|--------|--------|------------------|
| B-1 | 23 | 2000年10月～2003年1月 |
| B-2 | 23 | 2000年10月～2003年1月 |
| B-3 | 10 | 2000年10月～2003年1月 |
| G-1 | 6.2 | 2003年4月～2016年12月 |
| G-2 | 15 | 2003年4月～2016年12月 |
| G-3 | 28 | 2003年4月～2007年2月 |

2.2 分析項目及び分析方法

レーダーチャートを構成する項目は COD、生物化学的酸素要求量 (BOD)、全有機炭素 (TOC)、EC、イオン成分 (Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻) である。COD は 100 °C にお

ける過マンガン酸カリウムによる酸素消費量⁹⁾を測定した。BOD における溶存酸素濃度は YSI Model57 (Yellow Springs Instrument CO., Inc., Ohio)を用いて測定した。EC は指示部 HM-5S (東亜ディーケーケー株式会社)と電気伝導率セル CG-511B (東亜ディーケーケー株式会社)を用いて測定した。イオン成分は、試料を 0.45 μm のメンブランフィルター (アドバンテック東洋株式会社)でろ過した後、陰イオンは Dionex IonPac AS20 (Thermo Fisher Scientific K.K.)、陽イオンは Dionex IonPac CS12A (Thermo Fisher Scientific K.K.)を用いて分離し、イオンクロマトグラフィー Dionex ICS-1100 (Thermo Fisher Scientific K.K.)で測定した。TOC はモニタリング期間中に欠測が多かったが、平川ら (2017)の報告において最終処分場関連水の COD と TOC の単回帰分析の結果、良好な一次の直線関係がみとめられていることから (r² = 0.91)⁴⁾、欠測した TOC のデータについてはその回帰式を用いて算出した。

H₂S は検知管 (株式会社ガステック)を用いて現場の各測定地点で測定した。

2.3 レーダーチャートの作成方法

レーダーチャートの作成は、平川ら (2017)の方法によった⁴⁾。各月の浸透水の水質データについて、福岡県内各地の廃棄物最終処分場から採取した最終処分場関連水全試料 (n = 124)の各水質項目の平均値に対する比を求めると標準化し、各月のレーダーチャートを作成した。なおレーダーチャートは、全体の形状を視覚的に把握することに重点を置き、軸目盛の最大値は統一せずに適宜変化するように設定しているため、濃度の比較には注意が必要である。

3. 結果及び考察

3.1 H₂S 濃度変化

モニタリング全期間中の H₂S 濃度変化を図 1 に示す。H₂S 中毒による死亡事故は 1999 年 10 月に発生した。翌月の調査では事故が発生した地点において 870 ppm

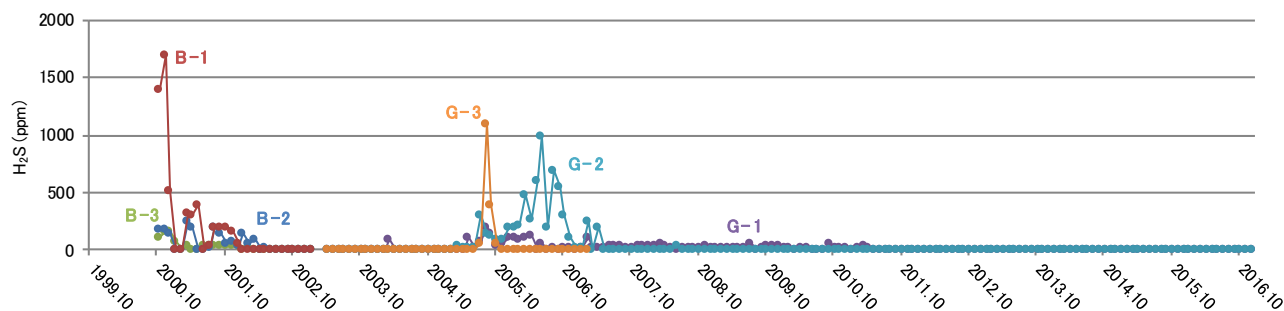


図1 H₂S濃度変化

を検出したが、定期的なモニタリング調査は 2000 年 10 月から開始されている。定期モニタリング 開始当初、B-1 において 1,700 ppm を検出した。その後徐々に濃度が低下し、2004 年まで H₂S の発生は沈静化していた。しかし、2005年に H₂S 濃度が上昇し、8 月に G-3 において 1,100 ppm を検出した。また翌 2006 年 5 月にも G-2 において 1,000 ppm が検出された。このため、当該処分場では雨水排除及び通気確保による対策が実施された。その結果、2007 年以降 H₂S 濃度は徐々に低下し、G-1、G-2 のどちらもほとんど発生しない状態となった。

3.2 レーダーチャートによる水質特性評価

3.2.1 モニタリング開始時から 2004 年まで（初期対策措置後の経時変化）

モニタリングを開始した 1999 年 11 月から 2004 年までの代表的なレーダーチャートを図 2 に示す。事故発生後の緊急調査時に H₂S 870 ppm を検出した 1999 年 11 月のレーダーチャートは、無機イオン成分に比べて有機物指標である COD や BOD の項目の値が高くなっており、微生物による分解作用を受ける有機物が多く存在していることが示唆された。また、この期間のレーダーチャートの形状は比較的变化が大きく、H₂S 発生や水質悪化を抑制するために実施された対策措置による影響を受け、埋立地内部の生物化学反応や物理化学反応が活発な

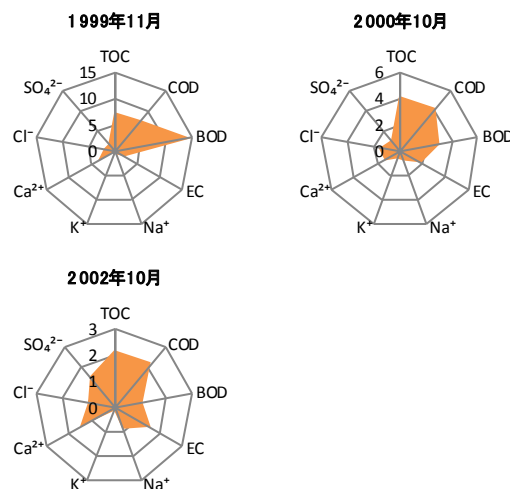


図2 モニタリング開始から 2004 年までの代表的なレーダーチャート

状態にあったと考えられる。対策措置後、H₂S の発生が沈静化してきた 2002 年 10 月のレーダーチャートは、有機物指標と無機イオン成分がおおむねバランスのとれた形状となった。また、各水質項目の平均値に対する比の値の最大値は 15 (1999 年 11 月) から 2.2 (2002 年 10 月) へと減少しており、埋立地内部は比較的安定し、H₂S が発生しにくい状態へと移行しつつあることがうかがえた。

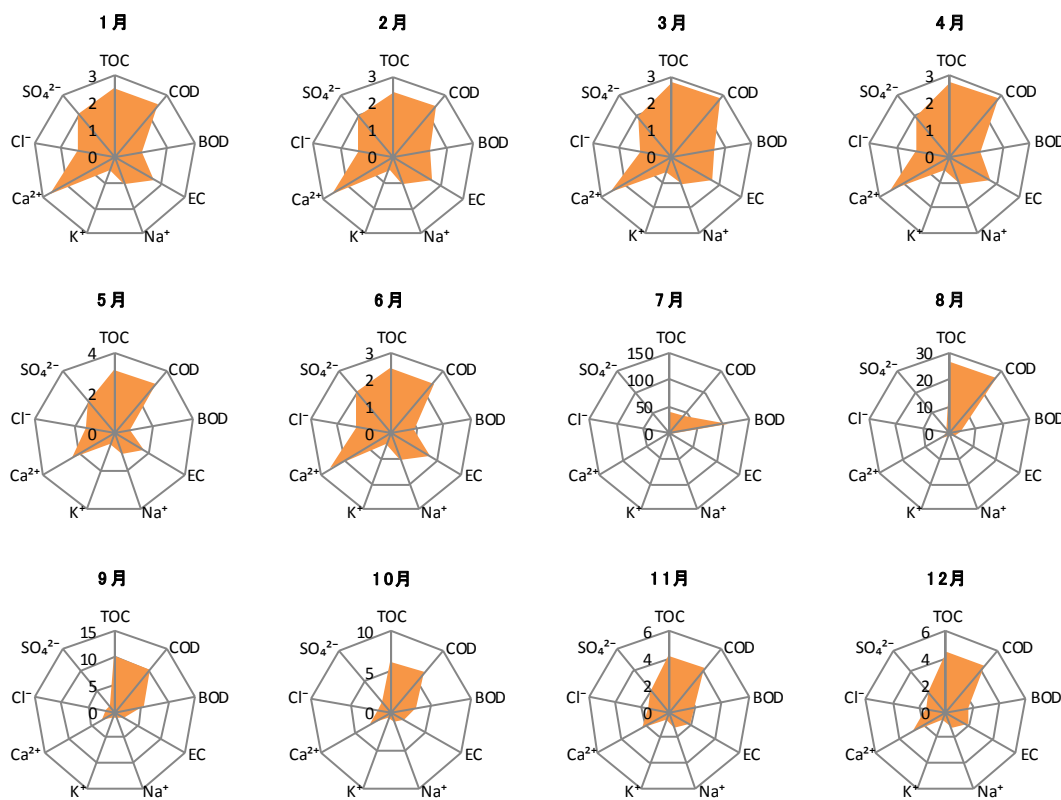


図3 レーダーチャート(2005年)

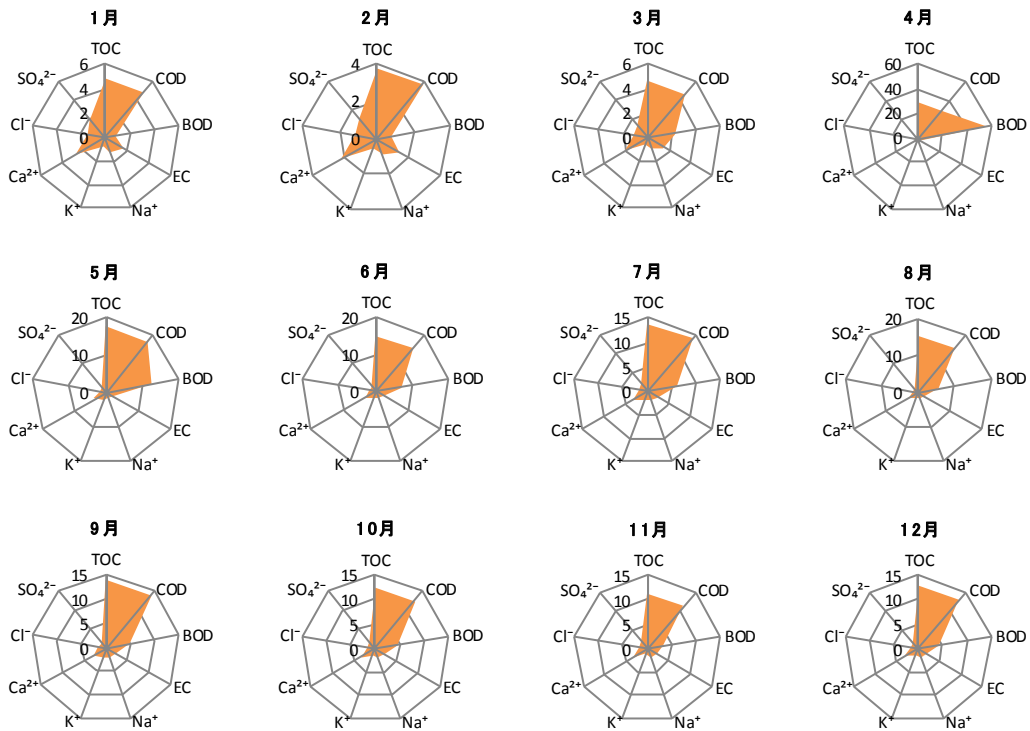


図4 レーダーチャート(2006年)

3.2.2 2005年及び2006年(突発的H₂S発生時の変化)

2005年の年間レーダーチャートを図3に示す。G-3において、8月に高濃度のH₂S(1,100ppm)を検出しているが、レーダーチャートを確認したところ、その前月の7月に有機物指標が急激に上昇、特にBODは顕著に高くなり、8月に急激に減少していることが分かった。また、2006年(図4)も同様に、G-2において高濃度のH₂S(1,000ppm)が発生した5月の前月である4月にBODが他の項目に比べて高くなり、その後減少していることがレーダーチャートで示された。しかし、2005年はH₂SとBODのどちらも急激な上昇及び下降を示したのに対し、2006年はどちらも比較的緩やかに変化した。

高濃度のH₂Sが発生した原因を調査した結果、現地に埋立地内部に水が滞留していたことが確認された。最終処分場埋立層内で高濃度のH₂Sが発生する条件は、①硫酸塩還元菌が存在すること、②硫酸塩(S)源が存在すること、③硫酸塩還元菌が増殖するに足る有機物源が存在すること、④硫酸塩還元菌が増殖するのに適当な温度・水分・嫌気の状態が保持されていること、⑤発生したH₂Sと化合する物質が少ないこと、が挙げられる¹⁰⁾。BODは一般に易分解性有機物の指標であることを踏まえると、2005年及び2006年の高濃度H₂S発生の原因は、埋立地内部で易分解性有機物が増加したこと、水の滞留により嫌気の状態となったことによって、上記の5つの条件が揃ったためであると考えられる。また、2005年

と2006年は高濃度のH₂Sが発生しているガス抜き管が異なることから、同じ埋立地内ではあるものの、局地的な発生スポットが異なっていたことが推察される。しかし、浸透水のレーダーチャートでは両時期ともにH₂S発生の前月に有機物指標が上昇しており、異なる場所でH₂Sが発生したとしても、埋立地全体を反映した浸透水を分析することによって検知できることが分かった。

このように、水質とH₂Sのモニタリングデータから、水質特性を示すレーダーチャートはH₂Sが発生する前に有機物指標の割合(特にBOD)が高くなる特徴的な形状を示すことが分かった。本事例はH₂S発生の前兆を検知し、未然に予防できる可能性があることを示唆している。

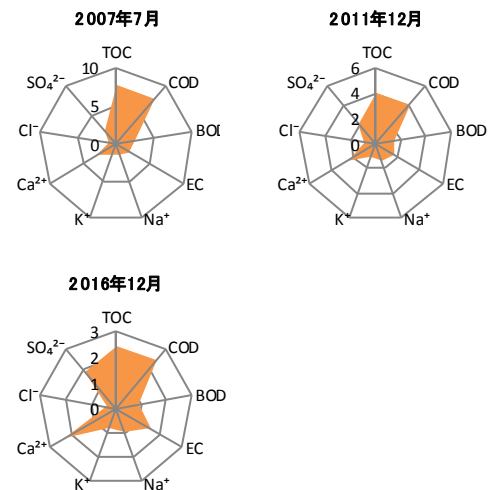


図5 2007年以降の代表的なレーダーチャート

3.2.3 2007年から2016年まで (H₂S 発生対策後の経時変化)

突発的に上昇した H₂S に対する対策措置後の代表的なレーダーチャートを図 5 に示す。この期間では、レーダーチャートの形状にほとんど変化はみられなくなった。一方、全体の濃度レベルは経時的に低下していた。また、H₂S も低下し、ほとんど検出されない状態となった。このことから埋立地内部は安定化した状態にあると推測される。

4. まとめ

本研究で用いたレーダーチャートによる水質特性評価手法は、その形状の変化を時系列で確認することによって、BOD に代表されるような有機物指標の変化を視覚的に把握できること、また、高濃度 H₂S 発生の兆候を察知する手段として利用できる可能性を示すことができた。

謝辞

本研究は、JSPS科研費JP16K21716の助成を受けたものです。

5. 引用文献

- 1) 香川智紀：産業廃棄物最終処分場の現状と課題，廃棄物資源循環学会誌，**23**，361，2012
- 2) 平川周作，志水信弘，鳥羽峰樹，池浦太荘，桜木建

- 治，大久保彰人：安定型最終処分場における硫化水素発生対策と経時的モニタリング，福岡県保健環境研究所年報，**41**，78-83，2014
- 3) 長森正尚，小野雄策，河村清史，山田正人，小野芳朗：浸出水質による一般廃棄物最終処分場の評価，廃棄物学会論文誌，**18**，325-334，2007
 - 4) 平川周作，志水信弘，堀就英，鳥羽峰樹：有機物指標と無機イオン成分を用いた廃棄物最終処分場関連水の特性評価，環境化学，**27**(2)，23-28，2017
 - 5) 高橋浩司，土田大輔，鳥羽峰樹，永瀬誠，宇都宮彬：安定型産業廃棄物処分場における事故調査，福岡県保健環境研究所年報，**30**，192-195，2003
 - 6) 厚生省：廃棄物最終処分場における硫化水素対策検討会報告書，2000
 - 7) 小野雄策：廃石膏ボード類埋立における硫化水素ガスの発生とその防止対策，安全工学，**49**，212-219，2010
 - 8) 環境省：温泉利用施設における硫化水素中毒事故防止のためのガイドライン，2017
 - 9) 一般財団法人日本規格協会：JIS K 0102 工場排水試験方法，東京
 - 10) 井上雄三編：国立環境研究所研究報告 第188号 安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究，p. 13，独立行政法人国立環境研究所，茨城，2005