

連続抽出による PFAS 汚染土壌の溶出特性に関する検討

○野島智也¹・日野良太²・町田瑞希¹・関友博¹・西川直仁²・日笠山徹巳²

¹ユーロフィン日本環境・²大林組

1. はじめに

有機フッ素化合物（以下、PFAS）の汚染土壌に係る情報は、国内において測定事例が蓄積・公開されておらず未知な部分が多い。PFAS はその多くがイオン性の界面活性剤であり、世界的にも問題視されている PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）や PFOA（ペルフルオロオクタン酸）およびこれらの前駆体なども含めるとその化学的性質は多岐にわたる。そのため土壌中では、イオンによる作用や界面活性剤としての性質など複雑な作用により土壌粒子や土壌に含まれる有機物と結合している可能性がある。筆者らは、様々な土壌試料の分析を行ってきた中で、PFAS の土壌から液相への溶出が水溶液の化学的性質によって異なることを経験してきた。本検討では、化学的性質を変えた水溶液による土壌からの連続抽出試験を行い、PFAS の土壌から液相への溶出特性に関して、溶出に用いる水溶液の化学的性質との関係解明を試みた。今回対象とした土壌は、PFAS の試薬を用いて作製した模擬汚染土壌と模擬汚染土壌を不溶化处理した試料であり、化学的性質が異なる各種水溶液による PFAS の溶出特性を比較した。

2. 試験方法

2.1 供試土壌の調製

連続抽出のための供試土壌として、真砂土を用いて作製した模擬汚染土壌を調製した。調製方法は、PFOS、PFOA 及び PFHxS を各 100 µg/L 含む溶液に真砂土を 1 週間含浸させた後、遠心分離により溶液を除去し、風乾、篩がけしたものを模擬汚染土壌とした。さらに模擬汚染土壌に不溶化处理を施したもの¹⁾を不溶化处理後の供試土壌として連続抽出試験に供した。

2.2 連続抽出試験

連続抽出試験は、改良 BCR 法の逐次抽出試験法²⁾を参考に、異なる液性の水溶液を用いて土壌から連続的に抽出処理を行い、抽出液の PFAS 濃度を測定した。表 1 に抽出に用いた各画分の水溶液リストを示す。

抽出容器には 250 mL ポリプロピレン（以降 PP）製遠沈管を用い、抽出処理は振とう機を用いて 16 時間実施した。振とう後に PP 製遠沈管をそのまま遠心分離にかけ、上清液を分離して分析用の画分とした。引き続き PP 製遠沈管の残った固形物（残渣）に次の画分となる水溶液を添加し、同様に 16 時間振とうした。この操作をすべての画分について連続的にを行い、それぞれの画分について PFAS（PFOS、PFOA 及び PFHxS）を分析した。連続抽出試験のフローを図 1 に示す。

なお、分析はユーロフィン日本環境が開発した HPLC-MS/MS を用いた迅速法³⁾（ダイレクトインジェクション法）により実施した。

表 1 連続抽出に使用した水溶液

	画分	添加試薬	溶液添加量
1	水可溶性画分	精製水（MQ 水）	40 mL
2	酸可用性画分	0.1M-酢酸水溶液	40 mL
3	塩基可溶性画分	0.1M-アンモニア	40 mL
4	還元性画分	0.5M-塩化ヒドロキシアニモニウム	40 mL

Study on leaching characteristics of PFAS contaminated soil by sequential extraction

Tomoya Nojima¹, Ryota Hino², Mizuki Machida¹, Tomohiro Seki¹, Naohito Nishikawa² and Tetsumi Higashiyama²

(¹Eurofins Nihon Kankyo, ²Obayashi Corp.)

連絡先：〒236-0003 神奈川県横浜市金沢区幸浦 2-1-13 ユーロフィン日本環境（株） 野島智也

TEL 045-330-0146 FAX 045-780-3849 E-mail tomoya.nojima@etjp.eurofinsasia.com

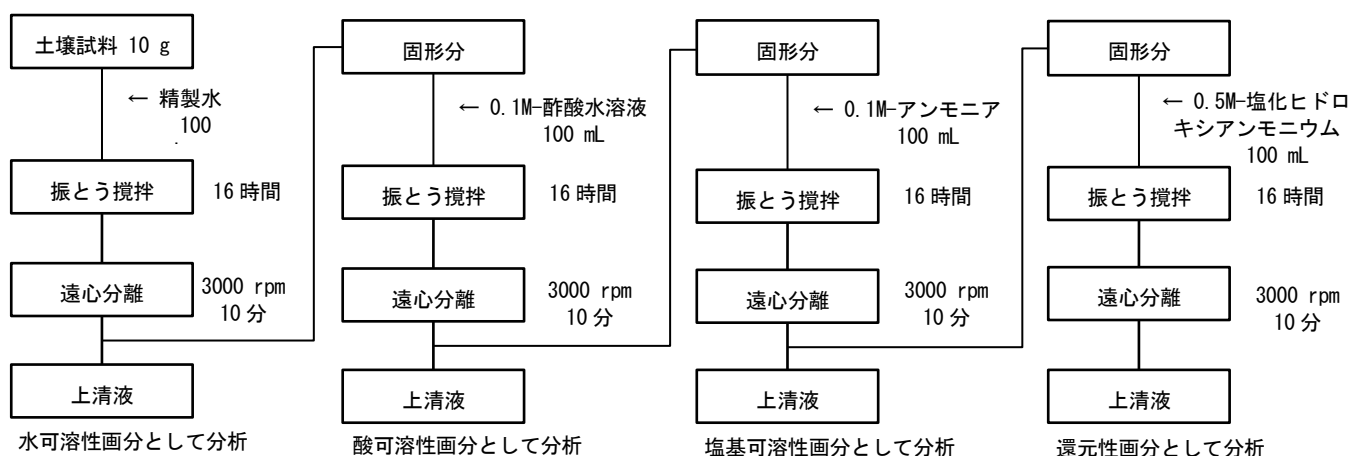


図 1 連続抽出試験の実施手順

3. 試験結果

3.1 模擬汚染土壌及び不溶化处理土壌の連続抽出試験

模擬汚染土壌の連続抽出試験の結果を表 2 に示す。すべての画分溶出量の合計値を 100 % とし、それぞれの画分での溶出割合を示した。

表 2 連続抽出試験の結果：模擬汚染土壌

測定項目	水溶性画分	酸可溶性画分	塩基可溶性画分	還元性画分	合計量
PFOS	89.6 %	4.8 %	5.6 %	0.1 %	100 %
PFOA	93.5 %	6.5 %	不検出	不検出	100 %
PFHxS	91.2 %	8.8 %	不検出	不検出	100 %

次に不溶化处理を行った模擬汚染土壌の連続抽出結果を表 3 に示す。不溶化处理前のすべての画分溶出量の合計値を 100 % とし、不溶化处理後の溶出割合を算出した。

表 3 連続抽出試験の結果：不溶化处理土壌

測定項目	水溶性画分	酸可溶性画分	塩基可溶性画分	還元性画分	合計量
PFOS	38.6 %	15.0 %	1.9 %	3.5 %	59.0 %
PFOA	61.3 %	12.2 %	1.9 %	3.4 %	78.8 %
PFHxS	49.7 %	10.7 %	不検出	5.7 %	66.1 %

3.2 環境省告示 46 号溶出試験

不溶化处理前の供試土壌及び不溶化处理後の供試土壌について、環境省告示 46 号による溶出試験を行った。溶出された PFAS 量について不溶化处理前のすべての画分溶出量の合計値を 100 % とした場合との溶出量の割合を表 4 に示す。なお、同表には、連続抽出試験合計値も再掲する。

連続抽出による抽出結果は、環境省告示第 46 号より高い結果を示しており、水だけでは溶出できない PFAS が溶液の液性を変えることにより抽出されることが分かった。また、不溶化处理土壌においては、より顕著に連続抽出試験による溶出量の合計が高いことが観察された。

表 4 不溶化处理土壤の環境省告示第 46 号溶出試験の結果

測定項目	環境省告示第 46 号溶出試験結果		連続抽出試験合計値	
	不溶化处理前	不溶化处理後	不溶化处理前	不溶化处理後
PFOS	86.1 %	18.6 %	100 %	59.0 %
PFOA	90.5 %	48.0 %	100 %	78.8 %
PFHxS	78.1 %	38.1 %	100 %	66.1 %

4. 考察

4.1 模擬汚染土壤及び不溶化处理土壤の連続抽出特性について

模擬汚染土壤の供試土壤では約 90 %の PFAS が水溶性画分に抽出され、化学的特性を変えた水溶液での溶出特性を十分把握できなかった。今回供試した土壤が有機質を含まない真砂土であったことから、当該特性を把握するにはより PFAS が吸着しやすい土壤での試験の必要があると考える。PFAS の土壤残留性は、当初の想定どおり PFOS>PFHxS>PFOA の順に強く、PFOS については塩基可溶性画分、還元性画分においても溶出が確認できた。

一方、不溶化处理を行った供試土壤において、水溶性画分はその溶出量が減少しており、特にスルホン酸において顕著であった。また、酸可溶性画分についてはその溶出量が 10 %以上あり、不溶化处理においてアルカリ固化を用いていることと関連があると考えられた。なお、すべての PFAS において還元性画分は検出されており、合計値も不溶化处理を行っていないものと比べると低かった。

4.2 連続抽出試験と環境省告示 46 号溶出試験における溶出特性の差異について

不溶化处理前の供試土壤の連続抽出における溶出量の合計値を 100 %とした場合、水だけで溶出試験を行う環境省告示 46 号溶出試験結果はいずれも低い値であった。特に不溶化处理土では PFOS で 18.6 %、PFOA で 48.0 %、PFHxS で 38.1 %との結果となっており、不溶化处理が一定の効果を上げていることがうかがえた。

5. まとめ

今回の検討により溶液の化学的性質を変えた連続抽出処理により、PFAS の土壤からの溶出特性について一定の評価が可能であることが分かってきた。特に不溶化处理を行った土壤の溶出特性について一定の評価を行える可能性があると考えられる。今後は異なる土質を用いた試験や、PFOS、PFOA、PFHxS 以外の前駆体も含む多様な PFAS や界面活性剤など薬剤を含んだ実際の消火剤による試験を実施する予定である。

【参考文献】

- 1) 日野 良太・鎌田 明秀・西川 直仁・日笠山 徹巳(2024) : PFAS 汚染土壤の不溶化处理に関する適用可能性, 第 16 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.505-509.
- 2) 貫上 佳則・毛利 光男・加瀬 隆雄(2008): 改良 BCR 逐次抽出法による汚染土壤中の重金属の形態と溶出特性の評価, 土木学会論文集 G Vol.64 No.4, 304-313
- 3) Tshumah-Mutingwende Rosamond et.al(2021) : PFAS Screening test - An essential tool for analytical decision making, 29th Symposium on Environmental Chemistry (Osaka)