

安全な農畜水産物安定供給のための包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業

「持続可能な農林水産業推進とフードテック等の振興に対応した未来の食品安全プロジェクトのうち、
農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明」

令和5年度 研究実績報告書

課題番号	23812803
課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明

研究実施期間	令和5年度～令和9年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
研究総括者	高度分析研究センター長 山崎 俊正
共同研究機関	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所
	公益財団法人ひょうご環境創造協会
	国立大学法人神戸大学
	アジレント・テクノロジー株式会社
	株式会社島津製作所
	日本ウォーターズ株式会社
	株式会社島津テクノリサーチ

＜別紙様式2＞研究実績報告書

令和5年度 安全な農畜水産物安定供給のための
包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業
「農作物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明」
研究実績報告書

I. 研究の進捗状況等

本課題は、行政による農産物由来のPFAS摂取のリスク管理に資するため、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農作物へ移行する場合、その特徴的な分子種や移行程度を解明するとともに、この動態解明に必要な試験・分析法を開発することを目的としている。

試験・分析法については、これまでに開発した土壌中のPFAS分析法の精度向上、分析夾雑物の多い農業用水及び農作物に含まれるPFASの簡便で迅速な手法開発に向けて、今年度は、従来法よりも少量の試料量で、簡便、迅速かつ正確に農業用水中の多成分PFASの分析ができる新規手法開発に取り組み、暫定法を作成し、計画通り研究が進捗した。

農作物への移行特性の解明については、栽培地選定のため、国内の各種農地土壌中のPFASの分子種や濃度のスクリーニングを行った。さらに、一圃場内の土壌中のPFASの分子種や濃度の水平分布を詳細に調査し、その実態を明らかにした。また、農産物へのPFASの移行メカニズムを明らかにするため、ウリ科作物の導管液を用い、PFOS及びPFOAの動態の相違を観測した結果、作物種や品種により吸収・移行に特徴があることを示し、計画通り研究が進捗した。

1. 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発

課題1－（1）の農業用水中のPFAS分析法の開発では、消費・安全局から提供された農業用水を用い、液体（水）と固体（浮遊物）を分離し、それぞれを抽出することによって、簡便、迅速かつ正確にPFASを定性・定量できる可能性を見出し、農業用水に適した分析法の確立に向けた準備が完了した。課題1－（2）では、土壌中PFAS分析ワークショップを実施し、参画機関間でPFAS分析手法の高度化・標準化を図るとともに、同一の標準溶液によるPFAS分析技能の評価を実施し、良好な結果を得た。

2. 各種農作物へのPFAS移行特性の解明

課題2－（1）にて先行研究の基盤分析技術である「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」に則し、消費・安全局から提供された28種の国内の農地土壌におけるPFAS分子種やその濃度の探索を行い、それぞれの土壌の特性を明らかにした。また、一圃場内から1メートルメッシュで採取した農地土壌におけるPFAS分子種やその濃度の水平分布を詳細に調査することによって、PFASの空間的分布やその実態を初めて明らかにした。課題2－（2）ではウリ科作物を用い、PFASのうち、PFOS及びPFOAに着目し、栽培用水と作物の導管液に含まれる濃度を比較評価した。水から作物への移行程度はPFASの分子種、作物種・品種により異なっていた。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

Ⅱ. 実行課題ごとの研究進捗状況等

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農作物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	1 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
実行課題名	(1) 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・亀山眞由美		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	産総研 環境創生研究部門・環境計測技術研究グループ・谷保佐知 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、小野順子 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村 千里		

1) 研究目的

農業環境（農地土壌と農業用水）及び農作物中に特徴的に観測されるPFAS分子種を特定し、それぞれの濃度を把握するため、試料採取方法、前処理、抽出、精製、定性・定量測定についての試験・分析法を開発する。

2) 研究進捗状況

今年度は、実用的かつ実施者の負担の少ない農業用水中のPFASの分析法を検討した。試料量の削減や効率的な浮遊物の除去により、図1の汎用法では前処理ができなかったアオコを含む浮遊物の多い農業用水試料についても、PFASを観測できたほか、浮遊物に含まれるPFAS量も定量できた。さらに、濁度などが異なる6点の農業用水に本手法を適用し、農業環境中のPFAS動態の解明につながる成果を得た。

現在、その方法の抽出、精製、測定について予備的なマニュアルを作成中であり、計画通り順調に進捗している。

3) 令和5年度の達成目標

6点の農業用水を用いて試験を実施し、試料採取にかかる道具や方法、前処理方法を含めて包括的・実用的かつ実施者の負担の少ない手法を決定し、抽出、精製、測定につ

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

いて予備的なマニュアルを作成し（令和5－6年度）、1－（2）に提供して予備実証試験（令和5－6年度）に供する。

4) 令和5年度研究方法

農業用水としてため池など水の動きが少ない水源を利用する場合には、気温が上昇する夏にはアオコなどの水生生物が多く含まれる可能性がある。また、水田の代掻き時期には農業用水に土壌粒子が多く含まれる可能性があり、農業用水試料中の多成分PFASの分析では、このような夾雑物を多く含む試料に対応できる前処理法が必要となる。一方、これらの水生植物や炭素含量の高い土壌等の浮遊物に、PFASが吸着している可能性も考えられるため、農業用水から分離した浮遊物に含まれるPFASも分析する必要がある。

現在、国内分析機関で主に用いられている水道水や環境水を対象とした水試料分析の従来法は様々あり、多いものでは1 Lの水試料を分析に供することになっている。しかし、試料量が多いことにより、分析に要する時間が長くなるとともに、農業用水においては、浮遊物が多い場合は精製に使用するカラムが詰まるなどの問題があった。これらを解決し、より効率のよい、実用的かつ実施者の負担の少ない手法が強く求められている。

そこで、試料量を削減するとともに、浮遊物を効率的に除去できる方法を検討した。

消費・安全局から提供された、異なる6カ所で採取された農業用水について、従来法の中でも試料量の少ないISO 21675に基づく方法（図1）に加え、新たに考案した手法を用い、農業用水およびそれに含まれる浮遊物中のPFASの分析を行った。新規手法については論文等で公表する。

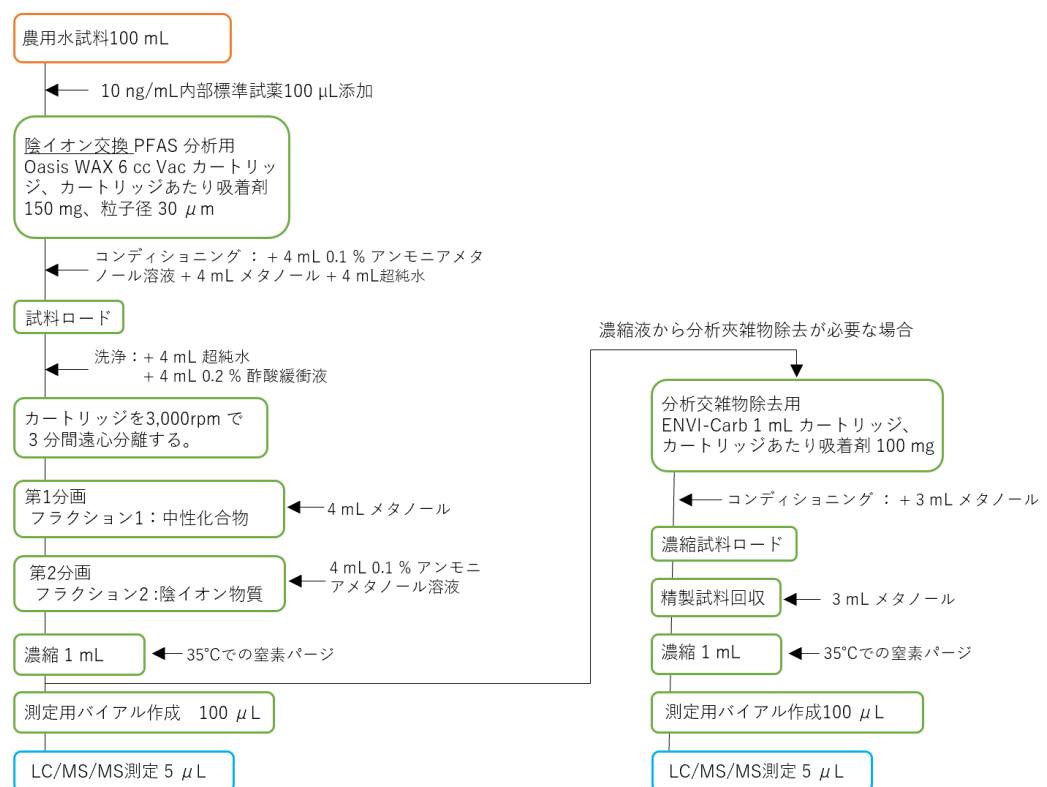


図1. ISO 21675に基づく水分析工程図（100 mL試料）

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

5) 令和5年度研究結果

異なる6カ所で採取された農業用水#1～6について、図1及び新規開発分析法でPFASを定量した。

分析対象とした農業用水は一般の河川水に比較して浮遊物を多く含み、中には緑色（アオコ）や茶色に着色している試料もあった（図2）。茶色に着色した試料は土壌粒子を多く含んでいると考えられた。PFAS画分として得られた試料に色が残っている場合は、Envi-Carbによる精製を実施した。



図2. 農業用水#1～6の外観

図1の分析法による分析結果を図3に示した。農業用水#1はアオコを多く含む試料であったため、PFAS分析用固相カラムに試料を添加した際、100 mLの試料のうち20 mLの通液時点でカラムが詰まり、吸引を実施しても試料の通液が不能になり、分析値が得られなかった。従って、図1の水分析法による結果（図3）は、農業用水#2～#6についてのみ示している。

一方、新たに考案した前処理法では、通液不能に陥ることなく、農業用水#1を含む6種の農業用水すべてを分析に供することができた（図4）。

PFOAを例にすると、新たに考案した前処理法では濃度は農業用水#3よりも農業用水#1で高く、浮遊物の多い試料についても分析値を得られる分析法の優位性が示された。

今回、浮遊物と水に含まれるPFAS濃度・種類を比較・検討した結果、それぞれ異なる特徴を観測できた。例えば、農業用水#1から分離された浮遊物（アオコ）では、PFOS（9.2 ng/L）の方がPFOA（1.5 ng/L）より多く含まれており、PFOSよりもPFOAを著しく多く含んでいた水とは異なる組成を示した。（図4、図5）。

以上の結果から、新たに考案した前処理法は、図1の水分析法では分析が困難である試料にも適用可能であり、少ない試料量でも分析対象とできることから、農業用水に適した、実用的かつ実施者の負担の少ないPFAS分析法として実証する価値があることを示した。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

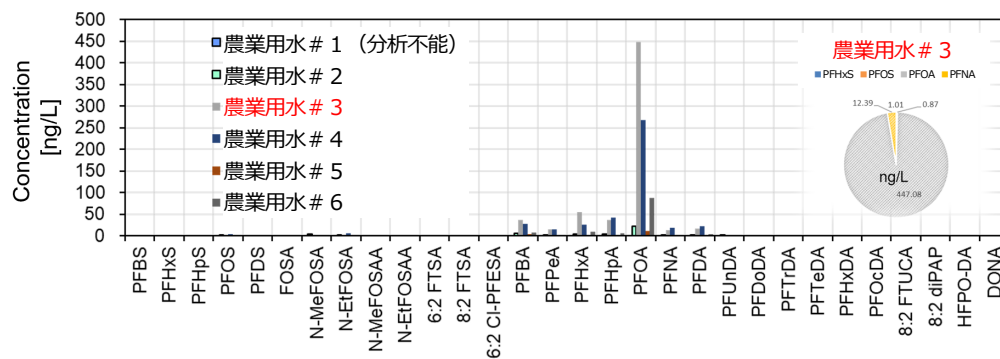


図3. 図1の水質分析方法による農業用水の分析結果(100 mL試料):農業用水#1はアオコを含んでおり、分析カラムが詰まったため、分析不能であり、結果なし。(円グラフはPFHxS, PFOS, PFOA, PFNA)

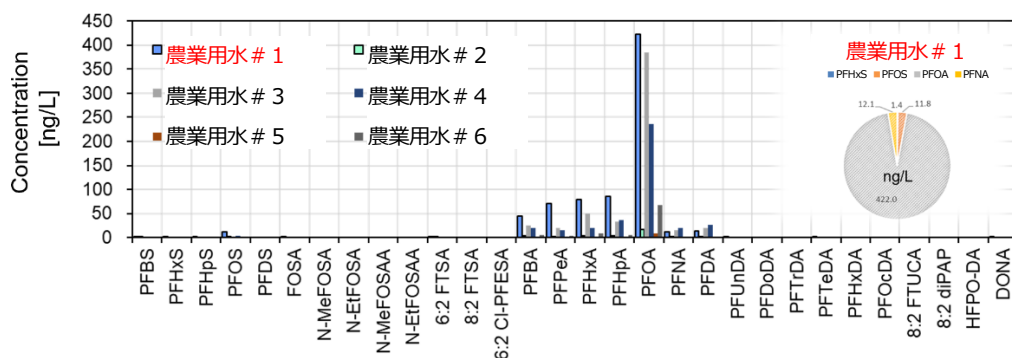


図4. 新規分析法による農業用水の分析結果:(水のみ)(円グラフはPFHxS, PFOS, PFOA, PFNAの割合を示す。)

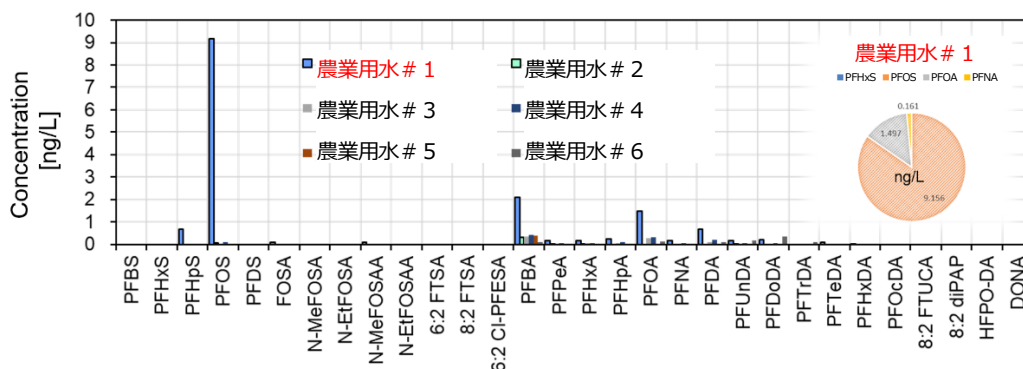


図5. 新規分析法による農業用水の分析結果(浮遊物のみ)(円グラフはPFHxS, PFOS, PFOA, PFNAの割合を示す。)

6) 現時点における令和5年度達成目標から見た問題点と令和6年度の達成目標

今年度は、実証試験が短期間で分析数が多くなかったため、結果を暫定値として示した。令和6年度は、農業用水の点数を増やし実証試験を重ねて、抽出、精製、測定について分析法の高度化を図る。また、採取法や採取時期などを詳細に検討し、規定するこ

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

とで一貫した試験分析法として暫定マニュアルを作成して、1－(2)と連携して検証を進め、農業用水に適した分析法を確立する。

7) 最終目標の達成見込み

新たに考案した農業用水の新規分析法が有用である可能性を確認でき、次年度の農業用水に適した分析法確立に向けた準備ができたことから、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農作物へ移行する際の特徴的な分子種や移行程度を解明し、行政による農産物由来のPFAS摂取のリスク管理に資する成果を創出するという本課題の目標の達成に向けて順調に進んでいると言える。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農作物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	1 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
実行課題名	(2) 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・亀山眞由美		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	産総研 環境創生研究部門・環境計測技術研究グループ・谷保佐知 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、小野順子、伴野有彩 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村千里 アジレント・テクノロジー社・ラボラトリーソリューション本部・城代 航、滝埜昌彦 島津製作所社・分析計測事業部・小林まなみ、岩佐奈実 日本ウォーターズ社・学術本部・岩田敏明、小寺和樹 島津テクノリサーチ社・環境事業部・高菅卓三、柴山 基、醍醐ふみ		

1) 研究目的

農業環境及び農作物中のPFASの分析法を、高精度で信頼性の高いものとするため、分析機器メーカーを含む複数の機関で評価・検証する。

2) 研究進捗状況

1 - (1) で考案された農業用水の新規分析法の次年度実証試験に向けて、担当機関が所有する装置等において測定可能な濃度範囲の確認を実施した。また、ワークショップ開催により、農業環境から農産物へのPFASの移行調査で重要となる、土壌に含まれるPFASの一斉分析法を担当機関すべてが習得した。課題開始が遅れたものの、次年度中の農業用水に適した分析法確立に向けて計画が進捗した。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

3) 令和5年度の達成目標

1－(1)で考案された農業用水の新規分析法について、令和6年度までに高精度で信頼性の高いものとするため、令和5年度は30種のPFASについて分析装置の測定可能範囲と精度を確認するとともに、農業用水の新規分析法の基盤となる土壌の分析法を習得する。

4) 令和5年度研究方法

コンソーシアム参画機関のうち6機関で、同一標準試薬を用いて検量線を作成した。農研機構から各機関に、30種のPFASの濃度が異なる(0.002、0.01、0.05、0.2、1、5、10 ng/mL)7点の標準溶液、内部標準(サロゲート)10 ng/mL、リカバリーテスト用標準(非標的PFAS)10 ng/mL、QC用溶液(サロゲートと非標的PFAS)1 ng/mLを配付し、各機関で検量線を作成した。その際、「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」に検証されているLCカラムであるBetaSil C18, ZORBAX Eclipse Plus C18, ACQUITY UPLC BEH C18, Shim-pack GIST-HP C18を用いて実施した。分析条件もマニュアルに従い、各機関が保有する装置に該当する測定パラメータを選択し、測定を行った。

5) 令和5年度研究結果

表1に示したように30種PFASの同一標準試薬に対する参画機関の検量線結果は良好な直線性(R^2)を示すことが確認できた。0.002、0.01、0.05、0.2、1、5、10 ng/mLの7点の濃度範囲における30種PFASの定量が可能な濃度については各機関の装置の性能、測定条件などに影響されるが、本課題実施には問題ないレベルであることが確認できた。

従って、この検量線を用いて今後予定している新規農業用水分析の実証実験に速やかに応用できる体制となった。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表 1. 参画機関における同一標準試薬による検量線結果

	機関A		機関B		機関C		機関D		機関E		機関F		
グループ1化合物	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	2 ppt-10ppb 機関数
PFHxS	0.9996	2 ppt-10ppb	0.9981	50 ppt-10ppb	0.9983	10 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9995	10 ppt-10ppb	0.9993	2 ppt-10ppb	10 ppt-10ppb 機関数
PFOS	0.9995	2 ppt-10ppb	0.9984	50 ppt-10ppb	0.9997	50 ppt-10ppb	1.0000	2 ppt-10ppb	0.9993	10 ppt-10ppb	0.9993	2 ppt-10ppb	50 ppt-10ppb 機関数
PFOA	0.9993	2 ppt-10ppb	0.9990	10 ppt-10ppb	0.9997	50 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9996	10 ppt-10ppb	0.9992	2 ppt-10ppb	200 ppt-10ppb 機関数
PFNA	0.9975	2 ppt-10ppb	0.9992	10 ppt-10ppb	0.9999	50 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9994	10 ppt-10ppb	0.9996	2 ppt-10ppb	
グループ2化合物	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	2 ppt-10ppb 機関数
PFBS	0.9991	2 ppt-10ppb	0.9983	10 ppt-10ppb	0.9996	10 ppt-10ppb	0.9998	2 ppt-10ppb	0.9986	10 ppt-10ppb	0.9993	2 ppt-10ppb	10 ppt-10ppb 機関数
PFHpS	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9966	50 ppt-10ppb	0.9999	50 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-10ppb	0.9992	2 ppt-10ppb	50 ppt-10ppb 機関数
PFDS	0.9995	2 ppt-10ppb	0.9955	50 ppt-10ppb	0.9996	50 ppt-10ppb	1.0000	2 ppt-10ppb	0.9993	10 ppt-10ppb	0.9997	2 ppt-10ppb	200 ppt-10ppb 機関数
FOSA	0.9989	2 ppt-10ppb	0.9929	50 ppt-10ppb	0.9999	10 ppt-10ppb	0.9997	2 ppt-10ppb	0.9998	2 ppt-10ppb	0.9992	2 ppt-10ppb	
PFBA	0.9964	2 ppt-10ppb	0.9997	10 ppt-10ppb	0.9998	200 ppt-10ppb	0.9997	50 ppt-10ppb	0.9996	200 ppt-10ppb	0.9992	2 ppt-10ppb	
PFPeA	0.9996	2 ppt-10ppb	0.9995	10 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	0.9998	2 ppt-10ppb	0.9996	10 ppt-10ppb	0.9992	2 ppt-10ppb	
PFHxA	0.9996	2 ppt-10ppb	0.9994	10 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	1.0000	2 ppt-10ppb	0.9991	10 ppt-10ppb	0.9991	2 ppt-10ppb	
PFHpA	0.9995	2 ppt-10ppb	0.9996	10 ppt-10ppb	0.9992	50 ppt-10ppb	1.0000	10 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9991	2 ppt-10ppb	
PFDA	0.9986	2 ppt-10ppb	0.9966	10 ppt-10ppb	0.9999	10 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-10ppb	0.9990	10 ppt-10ppb	0.9991	2 ppt-10ppb	
PFUnDA	0.9992	2 ppt-10ppb	0.9994	10 ppt-10ppb	0.9999	50 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9997	2 ppt-10ppb	0.9991	2 ppt-10ppb	
PFDoDA	0.9994	2 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	1.0000	10 ppt-10ppb	0.9997	2 ppt-10ppb	0.9996	2 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-10ppb	
PFTrDA	0.9981	2 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	1.0000	50 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-10ppb	0.9995	2 ppt-10ppb	0.9991	2 ppt-10ppb	
PFTeDA	0.9998	2 ppt-10ppb	0.9987	10 ppt-10ppb	1.0000	10 ppt-10ppb	0.9998	2 ppt-10ppb	0.9995	10 ppt-10ppb	0.9992	2 ppt-10ppb	
グループ3化合物	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	検量線R2	範囲	2 ppt-10ppb 機関数
N-MeFOSA	0.9996	2 ppt-10ppb	0.9989	50 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	0.9999	10 ppt-10ppb	1.0000	10 ppt-10ppb	0.9995	2 ppt-10ppb	10 ppt-10ppb 機関数
N-EtFOSA	0.9992	2 ppt-10ppb	0.9987	50 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	1.0000	10 ppt-10ppb	0.9993	10 ppt-10ppb	0.9991	2 ppt-10ppb	50 ppt-10ppb 機関数
N-MeFOSAA	0.9996	2 ppt-10ppb	0.9982	50 ppt-10ppb	0.9998	50 ppt-10ppb	0.9997	10 ppt-10ppb	1.0000	10 ppt-10ppb	0.9995	2 ppt-10ppb	200 ppt-10ppb 機関数
N-EtFOSAA	0.9991	2 ppt-10ppb	0.9978	50 ppt-10ppb	0.9997	10 ppt-10ppb	1.0000	2 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	0.9992	2 ppt-10ppb	
6-2 FTSA	0.9930	2 ppt-5ppb	0.9848	50 ppt-10ppb	0.9873	50 ppt-10ppb	0.9940	10 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	0.9934	2 ppt-5ppb	
8-2 FTSA	0.9952	2 ppt-5ppb	0.9823	50 ppt-10ppb	0.9898	200 ppt-10ppb	0.9956	10 ppt-10ppb	0.9988	10 ppt-10ppb	0.9997	2 ppt-5ppb	
9CI-PF3ONS	0.9983	2 ppt-10ppb	0.9955	10 ppt-10ppb	0.9996	10 ppt-10ppb	0.9995	2 ppt-10ppb	0.9988	2 ppt-10ppb	0.9987	2 ppt-10ppb	
PFHxDA	0.9993	2 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	0.9998	2 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-10ppb	
PFOcDA	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9975	50 ppt-10ppb	0.9996	10 ppt-10ppb	0.9995	2 ppt-10ppb	0.9995	2 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-10ppb	
8-2 FTUCA	0.9964	2 ppt-5ppb	0.9992	10 ppt-10ppb	0.9998	50 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9996	2 ppt-5ppb	
8-2 diPAP	0.9997	2 ppt-5ppb	0.9974	50 ppt-10ppb	0.9999	50 ppt-10ppb	0.9999	50 ppt-10ppb	0.9997	10 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-5ppb	
HFPO-DA	0.9996	2 ppt-10ppb	0.9998	10 ppt-10ppb	0.9997	10 ppt-10ppb	1.0000	2 ppt-10ppb	0.9999	50 ppt-10ppb	0.9993	2 ppt-10ppb	
DONA	0.9985	2 ppt-10ppb	0.9994	10 ppt-10ppb	0.9984	2 ppt-10ppb	0.9999	2 ppt-10ppb	0.9999	10 ppt-10ppb	0.9994	2 ppt-10ppb	

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

6) 現時点における令和5年度達成目標から見た問題点と令和6年度の達成目標

次年度中の農業用水に適した分析法確立に向けて準備が整ったため、令和6年度は計画通り、1－(1)からの農業用水新規分析法の予備的なマニュアル提供を受けて実証試験を行う。具体的には、多様な夾雑物を含む農業用水について内部標準物質の回収率を比較し、抽出、精製工程を評価する。得られた問題点を修正、補完し、1－(1)で作成する暫定マニュアルに反映する。

7) 最終目標の達成見込み

共通の標準試薬による検量線を作成し良好な結果が得られ、次年度の農業用水に適した分析法確立に向けた準備ができたことから、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農作物へ移行する際の特徴的な分子種や移行程度を解明し、行政による農産物由来のPFAS摂取のリスク管理に資する成果を創出するという本課題の目標の達成に向けて順調に進んでいると言える。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農作物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	2 各種農作物へのPFAS移行特性の解明		
実行課題名	(1) 農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	農研機構 農環研・土壌資源・管理グループ・前島勇治 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳 教、伴野有彩 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村千里		

1) 研究目的

国内で採取された2種以上の農地土壌を含む高濃度PFAS土壌を用いて、その土壌、農業用水、大気中のPFAS濃度、及びその環境下で栽培された3品目以上の農作物中のPFASについて調査し、農作物に移行しやすいPFAS分子種を特定するとともに、その移行特性を調べる。

2) 研究進捗状況

課題2(1)では、農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査のため、PFASの分子種や濃度分布が異なる2種以上の農地土壌の確保が必須である。1か所については、昨年調査を行った農家のA圃場を確保するとともに、圃場内の45地点から土壌試料を3点ずつ採取し、PFASの分子種や濃度の水平分布について検討した。また、それ以外の、農作物の栽培試験土壌を選定するため、消費・安全局から合計28点の土壌試料の提供を受け、その分析を完了した(参考資料)。

農地土壌から農作物へのPFAS移行動態調査の実施に向けて、候補土壌及び試験農作物の選定に活用できる知見を得た。農作物(根菜類:ジャガイモ)の前処理については皮へ付着した栽培土壌の影響について詳細に調べた。

なお、消費・安全局と協議して、次年度以降に実施予定としている栽培試験用の農地

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

土壌及び農業用水の分析を優先し、大気の試験方法の検討については、次年度実施することとした。

3) 令和5年度の達成目標

本研究課題が目的としている高濃度PFAS農業環境から農作物へ移行するPFAS分子種の特定と移行特性の解明に適した試験土壌を探索し選定する。次年度から開始する栽培試験に向けて、選定した土壌を有する圃場の状況や特性に適した試験設計の参考にする。農作物の栽培期間中に影響を及ぼす農業用水と大気の試験方法を検討する。

農作物（根菜類）の前処理については皮へ付着した栽培土壌の影響を詳細に調べ、付着土壌によるPFAS評価がどのように変動しうるかを明らかにする。

4) 令和5年度研究方法

・試験農地土壌の選定のための、土壌試料中のPFASの分子種や濃度分布の探索

消費・安全局から提供を受けた28種の農地土壌について、「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」に従い、前処理（風乾、ふるい、土壌水分含量測定、土壌中炭素含量測定、PFASの抽出、精製、測定（図6）を行った。なお、試料の測定におけるブランクテスト及びリカバリテスト用として農研機構が作製した砂試料を供した。

・同一圃場中の農地土壌におけるPFASの分子種や濃度の分布実態の解明

A圃場の3m×15mの試験区において3畝を耕耘機（刃30 cm、攪拌深さ15～20 cm）で攪拌した後、1メートルメッシュで各畝15カ所の深さ約15 cmの土壌を約1 kgずつ、「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」に基づいて45点採取した。採集した土壌はすぐに前処理（風乾、ふるい、土壌水分含量測定、土壌中炭素含量測定、PFASの抽出、精製、測定を行った。各地点（45地点）を3回繰返し、試験を実施した（計135試料）。なお、試料の測定におけるブランクテスト及びリカバリテスト用として農研機構が作製した砂試料を供した。

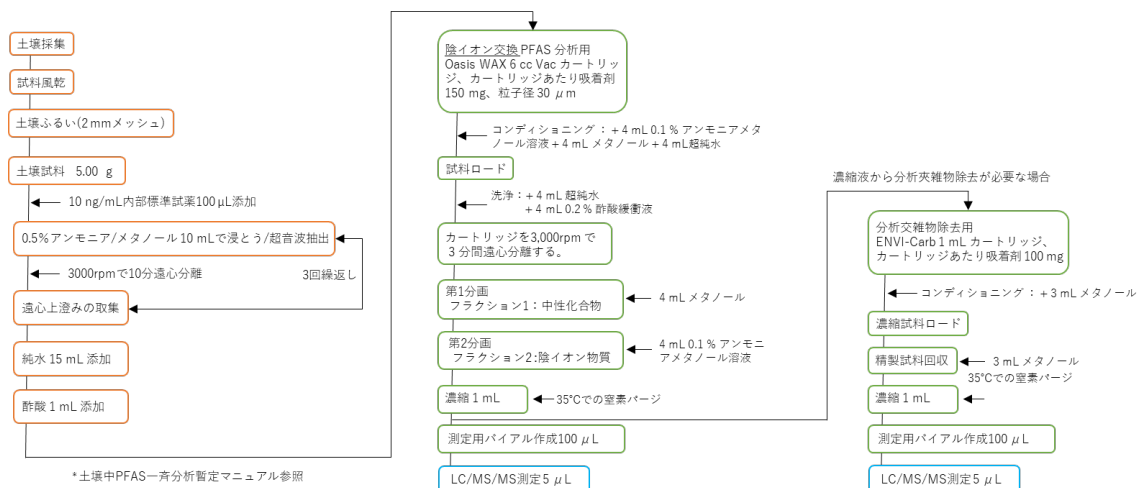


図6. 農用地土壌の分析方法の工程図

5) 令和5年度研究結果

・試験農地土壌の選定のための、土壌試料中のPFASの分子種や濃度分布の探索

国内で採取された28種の農地土壌中のPFASの分子種や濃度分布を測定した。これらの試料は総炭素含量が0.9%-6.5%の幅広い範囲を示したが、全試料を「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」によって良好な回収率で分析ができたことから、国内農用地土壌調査に有効であることが判明した。

試験に供した農地土壌のうち、20種の農地土壌はパーフルオロカルボン酸類(PFCAs)を多く含むが、それ以外はパーフルオロスルホン酸(PFSAs)を多く含んでいた。

試料の中には、PFUnDAの含有割合に特徴を有する土壌もあった。

「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」では回収率が低い(70%以下)とされている*N*-MeFOSA及び*N*-EtFOSAの内部標準の回収率が高い試料も認められた。今後、土壌の物理化学特性と*N*-MeFOSA及び*N*-EtFOSAの吸着・脱着に関するメカニズムについての検討に活用可能な土壌と考えられた。

・同一圃場中の農地土壌におけるPFASの分子種や濃度の分布実態の解明

A圃場の3m×15mの試験区において、1メートルメッシュで各畝15カ所の表層から深さ約15cmの土壌を「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」に準じ、採取、分析を実施し、PFASの分子種や濃度の水平分布を明らかにした。

各地点(45地点)から採取した土壌について、それぞれ3回併行分析を実施した結果、135点の分析試料中、総PFAS濃度(Σ PFAS30)は、最大約2倍の差を示した。3m×15mの試験区は小規模の圃場であるが、PFASの濃度と分布を詳細に調べると、土壌中のPFASの分子種や濃度は各々の地点で差異があることが明らかになった。このような試みは初であり、この知見は土壌中におけるPFASの蓄積・移動・残存などのシミュレーションをはじめ、PFASの環境リスク評価、農作物への影響などを評価する上で貴重な基礎知見である。

・根菜類(ジャガイモ)前処理及び試料形態におけるPFASの分子種や濃度の分布実態の解明

農作物(根菜類:ジャガイモ)の前処理として、皮へ付着した栽培土壌の影響について確認した。栽培土壌を「土壌に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル」を用いてn=3で実施した結果を図8に示した。土壌については、PFSAsの中ではPFHxSは検出されず、PFOSが平均437 ng/kg-dw(標準偏差27 ng/kg-dw)、PFCAsではPFOAが平均222 ng/kg-dw(標準偏差11 ng/kg-dw)からPFNA 平均455 ng/kg-dw(標準偏差19 ng/kg-dw)であった。

一方、その土壌環境で栽培された根菜類(ジャガイモ)において表面(皮)の処理をしないものと、流水(水道水+純水)で流したもの、ブラシを用いて流水(水道水+純水)で表面を前処理したものを比較した結果(図9)からいずれもPFBA(C4)、PFPeA(C5)、PFHxA(C6)が主に検出された。この結果を主成分分析による解析を行った結果、ジャガイモ栽培土壌中のPFASの分子種や濃度がそのまま反映されないことが明らかになった。一方、低濃度PFAS土壌のため、土壌粒子の皮表面への付着影響について前処理方法の差異は顕著ではないが、皮を除去した内部はいずれも濃度が低減されていることが明らかになった。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

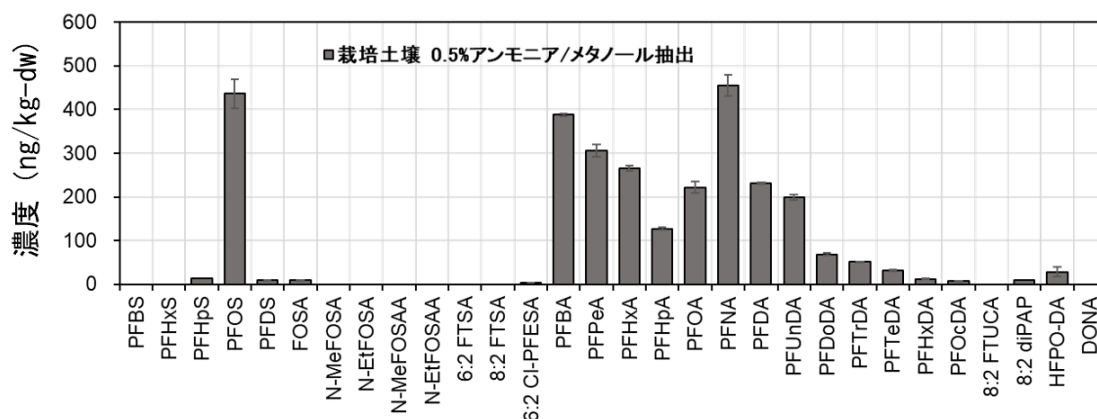


図8. 根菜類(ジャガイモ)栽培土壌におけるPFASの分子種や濃度(n=3)

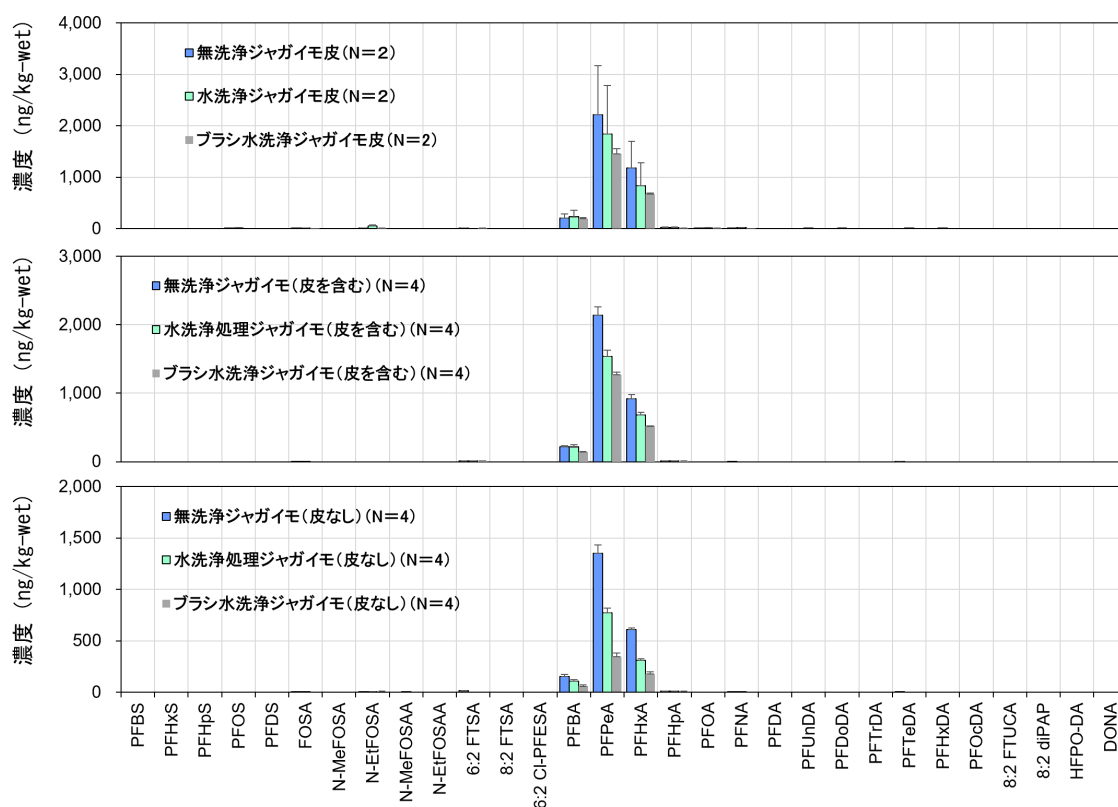


図9. 根菜類(ジャガイモ)の前処理方法及び試料形態におけるPFASの分子種や濃度

6) 現時点における令和5年度達成目標から見た問題点と令和6年度の達成目標

本課題2-(1)を実施するためのPFASの分子種や濃度が異なる農地土壌のスクリーニングが必須であることから、試験候補土壌の風乾から前処理、測定に注力した。この結果を踏まえ、早急に試験土壌を確保し試験実施を実現する必要がある。

根菜類(ジャガイモ)の試験土壌が低濃度PFAS土壌のため、前処理方法による土壌粒

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

子の皮表面への付着影響について明確ではなかった。令和6年度は各種農作物へのPFAS移行特性の解明のため、異なる2種以上の高濃度PFAS土壌の試験現場における各種農作物の栽培を開始し、農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査を実施する。

7) 最終目標の達成見込み

土壌、農業用水、大気からの農作物へのPFAS移行については多様な農地土壌中のPFAS分子種や濃度などの新たな知見が得られ、最終目標である動態の全容解明に向けた基盤作りができた。そのため、本課題は目標の達成に向けて順調に進んでいると言える。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農作物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	2 各種農作物へのPFAS移行特性の解明		
実行課題名	(2) 農作物へのPFAS吸収・移行のメカニズムの解明		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	神戸大・バイオシグナル総合研・シグナル分子応答研究部門・乾 秀之		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		

1) 研究目的

ウリ科作物のきゅうり、かぼちゃ、ズッキーニを用いて、PFAS の中でも特にPFOS及びPFOAの地上部への蓄積を評価する。さらに、PFOSとPFOAの蓄積と汚染物質輸送因子MLP (Major latex-like protein) の結合特性を調べる。

2) 研究進捗状況

きゅうり、かぼちゃ、ズッキーニ2品種の導管液におけるPFOS及びPFOA蓄積特性が明らかとなった。また、汚染物質輸送因子MLPとPFOS及びPFOAの結合親和性が明らかとなった。

3) 令和5年度の達成目標

疎水性有機汚染物質の蓄積程度が異なる3種のウリ科作物において、PFOS及びPFOAの蓄積特性を明らかにする。MLPとPFOS・PFOAの結合親和性を調べる。

4) 令和5年度研究方法

PFOS、もしくはPFOAを含む水を与えながら、3種のウリ科作物(きゅうり、かぼちゃ、ズッキーニ2品種)を人工気象器において3-4週間土耕栽培した。採取した導管液に含まれるPFOS、PFOA濃度を定量した。一方、MLPとPFOS、PFOAの結合親和性をAutoDock Vinaを用いてドッキングシミュレーションにより決定した。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

5) 令和5年度研究結果

疎水性汚染物質に対して高蓄積性を示すズッキーニRA品種を含むウリ科植物に1,000 µg/L、10,000 µg/Lの濃度でPFOSもしくはPFOAを添加した水道水を与えた場合、いずれの場合でも10,000 µg/Lを与えた方が導管液において高濃度で検出された。きゅうり、かぼちゃ、ズッキーニ2品種の導管液中PFOS及びPFOA濃度を比較したところ、ズッキーニRA品種に10,000 µg/Lを与えた区で最も高く、投与濃度の0.07%程度であることが明らかとなった。一方、疎水性汚染物質に対して低蓄積性を示すPG品種は、10,000 µg/Lを与えた区でもきゅうりやかぼちゃと同程度で、投与濃度の0.01%であった。

4種のウリ科作物が持つMLPとPFOS及びPFOAの結合自由エネルギーは、-8 kcal/mol以下となり、強い結合が予想された。また、MLPの内部に存在する空洞（キャビティー）の容積が大きいほどPFOS及びPFOAを強く結合することが予想された。

6) 現時点における令和5年度達成目標から見た問題点と令和6年度の達成目標

令和5年度の達成目標から見て、問題点はない。令和6年度の達成目標は、令和5年度のウリ科作物と同様に、トマト／じゃがいも（ナス科）、にんじん（セリ科）の導管液に含まれるPFOS及びPFOA濃度を定量する。また、ウリ科作物が持つMLPとPFOS及びPFOAの結合確認を行い、MLPがPFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能しているか調べる。

7) 最終目標の達成見込み

ウリ科作物に対するPFOS及びPFOAの蓄積特性を明らかにし、MLPがPFOS及びPFOAと結合することが予測された。したがって、MLPがPFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能していることを示唆できたことから、最終目標の達成に着実に近づいていると言える。

さらに、農作物の導管液からPFOS及びPFOAの評価ができることが確認できたので、この手法は短期間かつ簡便にPFASに対する農作物の吸収・移行性を評価できるスクリーニング手法としての可能性が示された。

※本報告書の内容は、令和5年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

参考資料 試験土壌中のPFAS濃度〔ng/kg-dw〕と内標準物質の回収率〔%〕

PFAS化合物名		検出下限	土壌#a	土壌#b	土壌#c	土壌#d	土壌#e	土壌#f	土壌#g	土壌#h	土壌#i	土壌#j	土壌#k	土壌#l	土壌#m	土壌#n	土壌#o	土壌#p	土壌#q	土壌#r	土壌#s	土壌#t	土壌#u	土壌#v	土壌#w	土壌#x	土壌#y	土壌#z	土壌#aa	土壌#ab	土壌#ac	
ハーフイオロル式・酸類	PFBS	1.3E+01	2.2E+01		2.0E+02								1.5E+01			1.5E+01	2.6E+01	2.4E+01		1.9E+01	1.4E+02								2.7E+01		2.6E+01	
	PFHxS	5.8E+00	1.6E+01	2.1E+01	3.0E+02	2.3E+01	9.3E+00	7.4E+00	1.4E+01	7.9E+00	1.4E+01	1.4E+01	8.0E+00	7.2E+01	8.9E+00	4.7E+01	8.1E+01	9.2E+01	5.4E+01	9.5E+01	1.2E+01	3.0E+02	2.3E+02	3.1E+01	8.7E+00						1.1E+01	
	PFHpS	9.6E+00			2.4E+01				1.1E+01	2.0E+01	3.4E+01	2.0E+01	1.3E+01			1.8E+01	3.6E+01	1.3E+01	1.2E+01	5.6E+01	1.5E+01	4.2E+01	1.1E+01			1.5E+01		2.4E+01	8.2E+01	3.9E+01	3.2E+01	
	PFOS	5.0E+00	1.3E+02	1.6E+02	2.0E+03	1.4E+02	1.7E+02	8.6E+01	1.8E+02	1.3E+02	2.2E+02	1.3E+02	1.4E+02	1.9E+02	1.7E+02	1.8E+02	2.3E+02	2.7E+02	1.7E+02	4.2E+02	1.6E+02	1.7E+03	2.0E+03	8.8E+02	3.9E+02	2.2E+02	2.0E+02	2.7E+02	5.9E+02	3.4E+02	1.7E+02	
	PFDS	6.9E+00	1.9E+01	5.7E+01	9.5E+00	1.5E+01	1.5E+01	9.2E+00	1.8E+01	2.0E+01	2.8E+01	7.4E+00	4.1E+01	1.9E+01	1.3E+01	2.3E+01	5.5E+01	3.1E+01	1.6E+01	4.2E+01			7.8E+00			1.5E+01	3.7E+01	5.5E+01	3.5E+01	1.6E+01		
	FOSA	1.7E+00	2.9E+00	2.8E+00	8.0E+00		1.8E+00		2.1E+00		1.7E+01		5.2E+00		1.9E+00	1.7E+00	1.9E+00	3.7E+00	6.7E+00	3.0E+00		2.3E+01	2.4E+01		5.0E+00	4.3E+00	5.6E+00	3.7E+00	7.2E+00	5.8E+00	4.2E+00	
	N-MeFOSA	4.2E+00	2.8E+01			5.5E+01	9.0E+01	1.9E+01	8.4E+00	6.2E+00	8.8E+00		6.1E+01		4.9E+01			5.2E+00		1.8E+01						1.6E+01					1.4E+01	
	N-EtFOSA	5.0E+00	6.7E+00	1.4E+01	8.0E+00	2.1E+01	9.7E+00	1.1E+01	2.5E+01	6.3E+00	1.4E+01		1.8E+01	2.2E+01	9.7E+00		5.3E+01	1.4E+01	2.9E+01	1.3E+01	6.5E+00	1.8E+01	8.6E+00		8.1E+00	6.0E+01	1.3E+01	5.8E+00	6.1E+00	1.8E+01		
	N-MeFOSAA	2.5E+00			3.6E+00							2.6E+00																				
	N-EtFOSAA	6.2E+00			2.4E+02															1.2E+01	6.8E+00										8.2E+00	
	6:2FTSA	3.2E+00									1.0E+01																					
	8:2FTSA	3.1E+00																														
	6:2Cl-PFESA	9.6E-01			1.1E+00																				1.2E+00	2.1E+00						1.9E+00
ハーフイオロル式・酸類	PFBA	3.2E+01	3.2E+01	9.3E+01	4.5E+03	9.8E+01	5.6E+01	7.2E+01	7.2E+01	7.1E+01	8.2E+01	6.3E+01	4.1E+01	3.0E+02	7.4E+01	1.4E+02	2.3E+02	2.9E+02	2.6E+02	3.0E+02	6.8E+02	7.0E+01	1.0E+02		1.1E+02	3.7E+02	9.1E+01		1.3E+02	9.0E+01	9.9E+01	
	PFPeA	6.2E+00	4.2E+01	8.3E+01	1.1E+04	1.1E+02	4.6E+01	5.5E+01	7.1E+01	6.0E+01	9.3E+01	5.5E+01	5.3E+01	3.2E+02	6.2E+01	1.7E+02	2.4E+02	3.9E+02	3.0E+02	3.9E+02	8.0E+02	1.2E+02	2.1E+02	3.2E+01	7.2E+01	1.9E+02	8.5E+01	3.5E+01	1.2E+02	8.4E+01	1.7E+02	
	PFHxA	4.0E+00	2.3E+02	3.0E+02	2.7E+04	3.3E+02	2.6E+02	1.2E+02	2.7E+02	1.3E+02	2.7E+02	2.1E+02	1.4E+02	1.4E+03	2.2E+02	8.1E+02	1.3E+03	1.8E+03	1.2E+03	1.7E+03	9.6E+02	1.3E+03	3.8E+01	7.6E+01	1.8E+02	9.5E+02	6.9E+02	2.4E+03	1.3E+03	3.1E+03		
	PFHpA	3.0E+00	1.2E+02	2.5E+02	7.9E+03	2.6E+02	8.8E+01	1.4E+02	2.1E+02	1.3E+02	2.1E+02	1.8E+02	1.6E+02	9.8E+02	1.9E+02	5.2E+02	1.9E+02	1.2E+03	7.7E+02	1.1E+03	2.9E+02	4.8E+01	3.4E+01	2.9E+01	6.3E+01	1.5E+02	6.3E+01	3.1E+01	1.7E+02	8.3E+01	1.0E+02	
	PFOA	9.3E+00	3.8E+03	6.6E+03	6.3E+04	5.2E+03	2.2E+03	2.2E+03	4.6E+03	2.5E+03	4.4E+03	3.8E+03	3.2E+03	2.1E+04	3.3E+03	1.3E+04	2.2E+04	2.6E+04	1.8E+04	2.5E+04	4.9E+03	1.4E+02	8.5E+01	1.8E+02	1.6E+02	1.5E+02	6.9E+02	2.4E+02	1.2E+03	6.7E+02	1.9E+03	
	PFNA	5.5E+00	4.0E+02	4.8E+02	1.9E+03	4.5E+02	3.0E+02	3.0E+02	4.1E+02	2.4E+02	4.3E+02	2.7E+02	4.1E+02	8.7E+02	2.1E+02	5.2E+02	8.5E+02	9.1E+02	6.6E+02	1.2E+03	2.3E+02	3.0E+02	3.3E+02	1.7E+02	2.6E+02	3.6E+02	2.8E+02	1.4E+02	5.0E+02	2.6E+02	4.0E+02	
	PFDA	6.9E+00	8.2E+02	1.1E+03	1.4E+03	1.1E+03	7.4E+02	7.4E+02	7.7E+02	5.4E+02	8.0E+02	6.8E+02	7.9E+02	1.7E+03	3.3E+02	1.1E+03	1.4E+03	1.4E+03	1.3E+03	2.1E+03	3.6E+02	5.5E+01	9.8E+01	3.7E+02	7.0E+02	1.5E+02	9.1E+02	4.0E+02	1.7E+03	8.4E+02	1.1E+03	
	PFUnDA	7.4E+00	2.7E+02	3.7E+02	3.6E+02	2.7E+02	3.2E+02	2.7E+02	2.5E+02	2.7E+02	2.6E+02	2.6E+02	2.0E+02	1.2E+02	1.9E+02	2.2E+02	1.4E+02	1.5E+02	2.1E+02	6.3E+02	1.8E+02	2.7E+02	2.0E+03	4.1E+02	1.5E+02	1.2E+03	4.8E+02	3.3E+03	1.4E+03	1.3E+03		
	PFDODA	9.8E+00	1.5E+02	2.1E+02	1.2E+03	1.7E+02	1.5E+02	3.0E+02	1.5E+02	1.4E+02	1.2E+02	1.4E+02	8.9E+01	8.0E+01	8.1E+01	6.6E+01	4.7E+01	7.8E+01	6.6E+01	8.2E+01	3.1E+01	6.2E+01	1.5E+02	3.8E+02	4.8E+01	2.4E+03	8.9E+02	9.1E+03	3.2E+03	2.1E+03		
	PFTtDA	7.9E+00	5.6E+01	6.5E+01	3.3E+03	5.6E+01	5.1E+01	6.6E+01	5.9E+01	5.4E+01	4.4E+01	5.1E+01	5.2E+01	4.3E+01	2.8E+01	3.1E+01	3.7E+01	3.0E+01	3.5E+01	4.1E+01	3.7E+01	4.0E+01	6.7E+01	6.9E+01	1.3E+02	2.6E+01	5.9E+02	3.0E+03	9.3E+02	5.8E+02		
	PFTeDA	4.3E+00	3.6E+01	6.3E+01	4.6E+01	4.1E+01	4.1E+01	1.1E+02	4.1E+01	4.7E+01	2.8E+01	3.1E+01	2.2E+01	1.7E+01	1.4E+01	1.4E+01	1.6E+01	1.3E+01	2.3E+01	1.6E+01	3.0E+01	1.2E+01	2.7E+01	5.0E+01	1.6E+02	1.9E+01	1.6E+03	6.3E+02	7.3E+03	2.7E+03	1.5E+03	
	PFHxDA	1.3E+00	1.4E+01	2.5E+01	2.2E+02	1.6E+01	1.6E+01	3.3E+01	1.5E+01	1.8E+01	1.1E+01	1.1E+01	1.0E+01	7.7E+00	7.3E+00	7.1E+00	8.0E+00	5.6E+00	7.9E+00	1.8E+00	1.2E+01	8.0E+00	9.5E+00	6.6E+01	7.7E+01	9.3E+00	1.1E+03	3.4E+02	4.1E+03	1.7E+03	9.1E+02	
	PFOxDA	6.7E+00			5.1E+01		9.6E+00																								4.1E+02	
	8:2FTUCA	2.9E+00			3.1E+00													3.5E+00				5.8E+00		4.8E+00							5.9E+00	
	8:2diPAP	7.2E+00		1.6E+01	4.5E+01		9.0E+00	1.8E+01	1.0E+01	4.2E+01	1.0E+01	1.0E+01										1.7E+01	2.1E+02		3.9E+01		2.0E+02	1.2E+02	7.5E+02	9.2E+03	2.0E+02	
	HFPO-DA	1.2E+01			1.4E+02										1.3E+01									2.4E+01			2.1E+01	3.0E+01	1.7E+01	4.5E+01	3.1E+01	4.7E+01
	DONA	9.4E+00	1.2E+01	1.8E+01	2.2E+02	2.1E+01			1.6E+01	1.1E+01	1.6E+01	1.0E+01	1.4E+01	7.7E+01	1.4E+01	3.5E+01	7.5E+01	9.8E+01	7.9E+01	1.0E+02	1.7E+01							2.9E+01	9.9E+00	1.8E+01		
内標準物質（安定同位体標識化合物）	M3-PFBS		93%	92%	90%	92%	93%	100%	93%	99%	90%	105%	99%	96%	99%	88%	104%	99%	98%	102%	96%	121%	95%	95%	83%	101%	106%	102%	115%	99%		
	M3-PFHxS		94%	97%	95%	101%	94%	96%	101%	114%	94%	105%	98%	103%	103%	97%	94%	113%	102%	104%	109%	91%	116%	88%	90%	95%	113%	102%	107%	110%	102%	
	M3-PFOS		98%	91%	91%	98%	82%	90%	83%	96%	80%	108%	97%	106%	96%	97%	92%	110%	108%	100%	109%	100%	108%	91%	92%	86%	113%	94%	108%	111%	106%	
	M3-FOSA		93%	85%	91%	116%	112%	105%	116%	116%	112%	113%	99%	63%	82%	109%	104%	98%	105%	96%	93%	89%	86%	87%	75%	87%	101%	110%	105%	98%		
	d3-N-MeFOSA		44%	41%	30%	53%	48%	46%	56%	51%	51%	47%	51%	52%	30%	41%	47%	47%	48%	46%	40%	49%	54%	45%	44%	23%	41%	48%	42%	41%	47%	
	d3-N-EtFOSA		44%	34%	25%	52%	42%	45%	45%	49%	45%	40%	47%	38%	30%	33%	43%	40%	43%	47%	36%	46%	52%	42%	44%	18%	45%	44%	42%	48%	45%	
	d3-N-MeFOSAA		121%	121%	117%	112%	122%	124%	124%	129%	120%	130%	130%	126%	13																	

安全な農畜水産物安定供給のための包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業

「農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明」

令和6年度 研究実績報告書

課題番号	23812803
課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明

研究実施期間	令和5年度～令和9年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
研究総括者	高度分析研究センター長 山崎 俊正
共同研究機関	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所
	公益財団法人ひょうご環境創造協会
	国立大学法人神戸大学
	アジレント・テクノロジー株式会社
	株式会社島津製作所
	日本ウォーターズ株式会社
	株式会社島津テクノリサーチ
	一般財団法人日本食品分析センター

＜別紙様式2＞研究実績報告書

令和6年度 安全な農畜水産物安定供給のための
包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業
「農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明」
研究実績報告書

I. 研究の進捗状況等

本課題は、行政による農産物由来のPFAS摂取のリスク管理に資するため、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農作物へ移行する場合、その特徴的な分子種や移行程度を解明するとともに、この動態解明に必要な試験・分析法を開発することを目的としている。

試験・分析法の開発については、開発済みの土壌中のPFAS分析法を応用し、本課題推進に大いに貢献した。今年度は、農業用水の多成分PFASの分析ができる手法開発に取り組み、暫定マニュアルを作成した。現在、この手法の検証のため、国内24機関にて共同試験を実施中である。多種・多様な農作物中のPFASの濃度を明らかにできる分析法が必要であるため、様々な農作物の形態、洗浄や剥皮等の前処理及び分析を妨害する物質を考慮し、令和7年度以降に手法確立を予定している根菜類（いも類を含む）、果菜類、葉菜類及び当初手法開発の対象としていなかった米について、予備試験を実施した。本年度は根菜類及び米の分析法についてはワークショップを実施するなど、計画よりも前倒しで研究が進捗した。

農作物への移行特性の解明については、土性と地域が異なる2カ所の水田において、水稻栽培における土壌、水、米（玄米）について詳細な検討を実施し、米に含まれるPFASの分子種と濃度について栽培環境との関連性を調べた。また、令和7年度以降の試験の実施に向けて、畑作物である根菜類、果菜類、葉菜類について同一試験圃場で栽培し、各種作物におけるPFAS濃度を試験的に測定した。昨年に続き、ウリ科作物が持つ汚染物質輸送因子MLP（Major latex-like protein）とPFOS及びPFOAの結合について詳細に調べた上で、2科の非ウリ科作物（ナス科のトマト、じゃがいも及びセリ科のにんじん）の間でPFOS及びPFOAの吸収・移行に違いがあることを示し、計画通り研究が進捗した。

1. 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発

課題1－（1）の農業用水中のPFAS分析を開発し、暫定マニュアル（英文・和文）を作成した。また、米、根菜類、果菜類、葉菜類の多成分PFAS一斉分析法を検討、開発し、本課題推進に貢献できた。

課題1－（2）では、1－（1）の「農業用水中のPFAS分析暫定マニュアル」に基づき、24機関の参画による共同試験を実施した。米と根菜類に関しては本課題参画2機関及び関連機関に対して、農作物PFAS分析ワークショップを実施し、参画機関間でPFAS分析手法の高度化を図った。

2. 各種農作物へのPFAS移行特性の解明

課題2－（1）では、異なる土性を有する2地域の水田圃場で栽培した米におけるPFASの分子種や濃度分布の探索を行い、その移行特性を明らかにした。また、令和7年度以降の試験の実施に向けて、畑作物に関しても根菜類、果菜類、葉菜類について同一試験圃場で栽培し、各種畑作物におけるPFAS濃度を試験的に測定した。昨年に続き、ウリ科作物におけるMLPとPFOS及びPFOAの結合や、2科の非ウリ科作物（ナス科のトマト、じゃがいも及びセリ科のにんじん）のPFOS及びPFOAの吸収・移行に違いがある可能性を示した。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	1 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
実行課題名	(1) 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
小課題 代表研究機関・ 研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・亀山真由美		
実行課題 代表研究機関・ 研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷熙洙		
共同研究機関・ 研究室・研究者 名等	産総研 環境創生研究部門・環境計測技術研究グループ・谷保佐知 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、小野順子 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村 千里		

II. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

農業環境（農地土壌と農業用水）及び農作物中に特徴的に観測されるPFAS分子種を特定し、それぞれの濃度を把握するため、試料採取方法、前処理、抽出、精製、定性・定量測定についての試験・分析法を開発する。

2) 研究進捗状況

今年度は、実践的かつ実施者の負担の少ない農業用水中のPFASの分析マニュアル（英文・和文）を作成し、本課題推進及び普及のための検討を開始した。また、本課題において、多種・多様な農作物中のPFASの分析が必要であるため、計画を前倒しして、根菜類、果菜類、葉菜類及び米について様々な分析夾雑物、前処理及び農作物の形態を考慮した予備試験を実施した。米については、当初の計画には含まれていなかったことを踏まえると、計画よりも大幅に前倒しで分析法の開発が進んでいるといえる。

3) 令和6年度の達成目標

農業用水中のPFASの分析マニュアルを作成し（令和5～6年度）、課題1－(2)に提供して予備実証試験（令和5～6年度）に供する。根菜類（令和6～7年度）に加えて米の実用的かつ実施者の負担の少ない手法の予備的なマニュアルを作成し、課題1－(2)に提供して予備実証試験（令和6～7年度）に供する。括弧内は当初計画時の予定年度を示す。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

4) 令和6年度研究方法

1) 農業用水の分析方法

農業用水には、様々な固体浮遊物やアオコのような水生生物が含まれる可能性がある。また、水田の代掻き時期には、農業用水に土壌粒子が多く含まれる可能性があり、農業用水試料中の多成分PFAS（本課題で対象とする30種のPFASを別紙1に示す）の分析では、このような夾雑物を多く含む試料に対応できる前処理法が必要となる。しかし、前処理工程で夾雑物を分離、除去してしまうと、農業用水を介して移行するPFASを過小評価するおそれがあるため、農業用水から分離した浮遊物に含まれるPFASも分析する必要がある。図1は、40 mLの試料から遠心分離により水（上澄み液）と固体浮遊物を分離後、固体浮遊物は別途抽出を実施して水の上澄み液と合わせて分析に供する方法である。

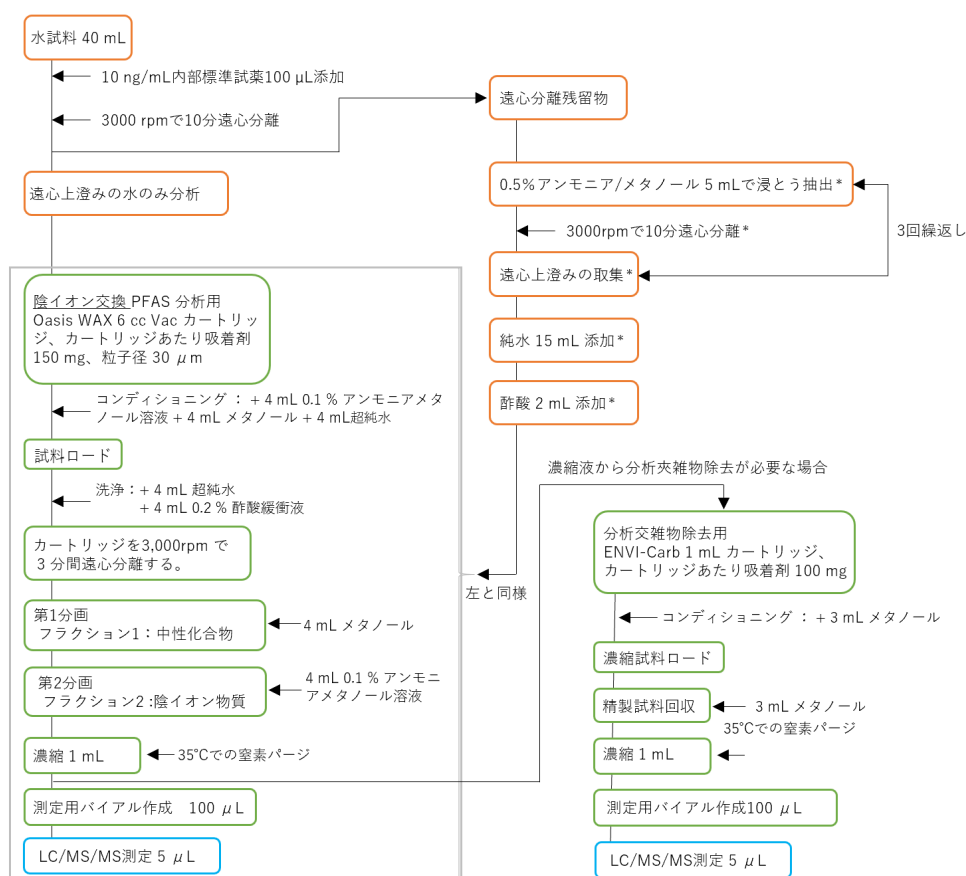


図1 農業用水における多成分PFAS一斉分析法の分析工程図

*は「土壌中多成分PFAS一斉分析法」と同じ操作であることを示す。

2) 米（玄米、白米）のPFAS試験・分析法の開発

米（玄米、白米）は主成分として澱粉を含み、アミロペクチン（約8割）とアミロース（約2割）から成る。アミロペクチンは多数の α -グルコースがグリコシド結合（ α 1-4結合及び α 1-6結合）によって重合した枝分かれの多い構造の高分子化合物、アミロースは多数の α -グルコースがグリコシド結合（ α 1-4結合）によって重合して直鎖状になった高分子化合物である。つまり、澱粉を主成分とする米（玄米、白米）は、枝分かれの多い構造と直鎖状になった高分子化合物を多く含んでいるために、安定

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

かつ効率的に多成分PFASの抽出、精製を行うことが難しい農作物である。そのため、予備検討の過程で様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどの組合せを検討した。その結果、図2（左列）のような前処理工程が米（玄米、白米）中の多成分PFASの分析に適することを見出した。

3) 根菜類のPFAS試験・分析法の開発

根菜類はじゃがいも、さつまいも、ダイコンについて検討した。様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、いも類のじゃがいもとさつまいも中の多成分PFASの分析には、図2に示すように、米と同じ前処理工程が適したが、ダイコンの場合は、固相抽出前の希釈度合を低くし、3度目の抽出溶媒をアセトニトリルとする条件が適していた。

4) 果菜類のPFAS試験・分析法の開発

果菜類として、きゅうり、ズッキーニ、トマト（ミニトマトを含む）について検討した。様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、ウリ科のきゅうりとズッキーニ中の多成分PFASの分析には、図2に示すように、でんぷんの多い米や、いも類と同様に3回目の抽出に0.5%アンモニア/メタノールを用い、固相抽出前の溶液量を15 mLとする前処理工程が適した。しかし、ナス科のトマト（ミニトマトを含む）の場合は、ダイコンと同様に3回目の抽出にアセトニトリルを用いる前処理工程が適していた。

5) 葉菜類のPFAS試験・分析法の開発

葉菜類として、ほうれんそう、キャベツについて検討した。様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、図2に示すとおり、ダイコンやトマト（ミニトマトを含む）と同じ前処理工程がほうれんそうとキャベツ中の多成分PFASの分析に適していた。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

生物も含まれる農業用水や環境水等の分析に対応できるよう、実用性を高めるとともに、実施者に負担が少なくなるよう高度化を図り、暫定マニュアル（英文・和文）として作成した（図3）。このマニュアルに収載した分析手法について、多種・多様な水試料に適用した結果、既存の国内外の水分析手法（ISO及びEPA法等）では、測定が難しかった試料の分析も可能であった。単一試験室での妥当性確認の評価試験の結果、多成分PFASに対しても安定かつ優れた回収率を示すことが明らかになった（表1）。本研究では、課題2－（1）農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査にて、水田の農業用水中PFASの分析に適用した。その結果、本法は実用的かつ簡便な分析方法として普及の可能性があると判断された。そのため、課題1－（2）農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価において、水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験を実施し、ここでも良好な結果が得られたので、分析法の公開と普及を検討している。



図3 農業用水暫定マニュアルと多成分PFAS一斉分析工程イラスト

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表 1. 単一試験室での妥当性確認

(ランダムに選択した共同試験試料10点の測定結果。試料の詳細については、実行課題 1
ー (2) II. 実行課題ごとの研究進捗状況等の、4) 令和6年度研究方法を参照。
左：ネイティブ30PFAS化合物の分析結果。平均値、標準偏差の単位はng/L。右：サロゲート24PFAS化合物の回収率)

		平均值 (N = 1 0)	標準偏差 (N = 1 0)	CV%* (N = 1 0)
PFSA _s	PFBS	9.4	1.1	12%
	PFHxS	10.2	1.5	15%
	PFHpS	10.1	1.1	11%
	PFOS	10.2	1.2	11%
	PFDS	10.3	1.1	11%
	FOSA	10.4	1.2	11%
	N-MeFOSA	8.9	1.0	11%
	N-EtFOSA	9.7	0.9	9%
	N-MeFOSAA	9.8	1.4	14%
	N-EtFOSAA	9.6	0.7	7%
	6:2FTSA	22.7	12.7	56%
	8:2FTSA	10.0	1.5	15%
6:2Cl-PFESA	9.1	0.8	9%	
PFCA _s	PFBA	24.0	3.3	14%
	PFPeA	19.7	2.8	14%
	PFHxA	15.3	1.8	12%
	PFHpA	13.4	1.3	10%
	PFOA	11.8	1.4	12%
	PFNA	11.3	1.0	9%
	PFDA	10.6	1.6	15%
	PFUnDA	10.6	1.2	12%
	PFDoDA	10.5	1.3	12%
	PFTTrDA	9.8	1.4	14%
	PFTeDA	9.9	1.0	10%
	PFHxDA	9.0	0.9	10%
	PFOcDA	8.5	0.8	10%
	8:2FTUCA	10.9	1.2	11%
	8:2diPAP	8.6	1.0	12%
	HFPO-DA	16.3	2.5	15%
	DONA	9.7	1.3	14%

		平均值 (N = 1 0)	標準偏差 (N = 1 0)	CV%* (N = 1 0)
surrogate	M3-PFBS	96%	7%	7%
	M3-PFHxS	104%	12%	11%
	M8-PFOS	106%	9%	9%
	M8-FOSA	99%	7%	7%
	d3-N-MeFOSA	52%	7%	13%
	d5-N-EtFOSA	39%	4%	11%
	d3-N-MeFOSAA	102%	15%	14%
	d5-N-EtFOSAA	101%	13%	13%
	M2-6:2FTSA	104%	12%	11%
	M2-8:2FTSA	99%	13%	13%
	M4-PFBA	114%	8%	7%
	M5-PFPeA	93%	15%	16%
	M5-PFHxA	94%	7%	8%
	M4-PFHpA	101%	9%	9%
	M8-PFOA	109%	12%	11%
	M9-PFNA	104%	12%	11%
	M6-PFDA	103%	12%	12%
	M7-PFUnDA	99%	11%	12%
	M2-PFDoDA	106%	13%	12%
	M2-PFTeDA	106%	9%	9%
	M2-PFHxDA	108%	12%	11%
	M2-8:2FTUCA	104%	12%	12%
	M4-8:2diPAP	113%	16%	14%
	M3-HFPO-DA	98%	12%	12%

注) CV%*は、変動係数 (Coefficient of Variation) の略で、標準偏差を平均値で割った値に100を掛けたものである。CV% = 標準偏差 ÷ 平均値 × 100

黄色でハイライトした化合物は、主要4種PFAS化合物及びそのサロゲートを示す。

・米（玄米、白米）のPFAS試験・分析法の開発

米（玄米、白米）は澱粉の主成分であるアミロペクチンとアミロースのような高分子化合物を多く含んでいるために、安定かつ効率的な多成分PFASの抽出、精製が難しい。そのため、様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、図2の通り、試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで2回抽出後、10 mLの0.5%アンモニア/メタノールで1回抽出を行い、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に純水を加えて45 mLにメスアップし、酢酸でpHを調整後、精製工程を経ることで安定かつ正確な分析ができた。表2に示したように、主要4種PFAS化合物について、優れた内部標準物質の回収率、標準偏差、変動係数が得られた。そのため、本分析法を実行課題「2ー(1) 農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査」にて米（玄米）のPFASの分析に適用した。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表2. 米（玄米、白米）のPFAS試験・分析法における主要4種PFAS化合物（グループ1化合物）内部標準物質（0.2 ng/g）の回収試験結果

米（白米・玄米）（N=3）				
グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数（CV値）
	PFHxS	98%	4%	4%
	PFOS	85%	3%	3%
	PFOA	109%	6%	5%
	PFNA	109%	4%	4%

・根菜類のPFAS試験・分析法の開発

多種・多様な根菜類の中からじゃがいも、さつまいも、ダイコンについて様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、図2の左列の通り、いも類（じゃがいも、さつまいも）は、米と同様に、各試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで2回抽出後、10 mLの0.5%アンモニア/メタノールで1回抽出を行い、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に、純水を加えて45 mLにメスアップし、酢酸でpHを調整することにより安定かつ正確な分析ができた（表3）。

一方、ダイコンは、図2の右列の通り、試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで3回抽出後、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に、純水を加えて15 mLにメスアップし、酢酸でpHを調整することにより安定かつ正確な分析ができた（表4）。そのため、上記の分析法を、本研究課題「2-（1）農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査」にて根菜類（じゃがいも、さつまいも、ダイコン）のPFASの分析に適用した。

表3. 根菜類（じゃがいも、さつまいも）のPFAS試験・分析法における主要4種PFAS化合物（グループ1化合物）内部標準物質（0.2 ng/g）の回収試験結果

ジャガイモ（N=3）				
グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数（CV値）
	PFHxS	77%	7%	9%
	PFOS	90%	6%	6%
	PFOA	101%	1%	1%
	PFNA	96%	5%	5%

サツマイモ（N=3）				
グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数（CV値）
	PFHxS	98%	2%	2%
	PFOS	82%	8%	10%
	PFOA	111%	6%	6%
	PFNA	118%	8%	7%

表4. 根菜類（ダイコン）のPFAS試験・分析法における主要4種PFAS化合物（グループ1化合物）内部標準物質（0.2 ng/g）の回収試験結果

ダイコン（N=3）				
グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数（CV値）
	PFHxS	97%	10%	10%
	PFOS	90%	11%	12%
	PFOA	108%	4%	3%
	PFNA	97%	2%	2%

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

・果菜類のPFAS試験・分析法の開発

多種・多様な果菜類の中からきゅうり、ズッキーニ、トマト（ミニトマトを含む）について様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。

図2の中列に示す通り、きゅうりとズッキーニは各試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで2回抽出後、10 mLの0.5%アンモニア/メタノールで1回抽出を行い、抽出液を窒素で5 mLまで濃縮した試料に純水を加えて15 mLにメスアップし、酢酸でpHを調整し、抽出・精製した。分画後も試料中に残る分析夾雑物除去のため、ENVI-Carbを用いた精製工程を実施することで安定かつ正確な分析ができた（表5）。

一方、トマト（ミニトマトを含む）は、ダイコンと同様、試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで3回抽出後、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に純水を加えて15 mLにメスアップし、酢酸でpHを調整し、抽出・精製した。分画後も試料中に残る分析夾雑物については、ENVI-Carbを用いた精製工程により除去することで安定かつ正確な分析ができた（表6）。そのため、上記の分析法を、本研究課題「2-（1）農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査」にて果菜類（きゅうり、ズッキーニ、トマト（ミニトマトを含む））のPFASの分析に適用した。

表5. 果菜類（きゅうりとズッキーニ）のPFAS試験・分析法における主要4種PFAS化合物（グループ1化合物）内部標準物質（0.2 ng/g）の回収試験結果

きゅうり (N=3)					ズッキーニ (N=3)				
グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数 (CV値)	グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数 (CV値)
	PFHxS	99%	13%	13%		PFHxS	104%	7%	7%
	PFOS	91%	2%	2%		PFOS	109%	7%	6%
	PFOA	104%	2%	2%		PFOA	120%	7%	6%
	PFNA	94%	12%	12%		PFNA	113%	5%	4%

表6. 果菜類（トマト）のPFAS試験・分析法における主要4種PFAS化合物（グループ1化合物）内部標準物質（0.2 ng/g）の回収試験結果

トマト (N=3)				
グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数 (CV値)
	PFHxS	86%	3%	4%
	PFOS	84%	8%	10%
	PFOA	89%	13%	14%
	PFNA	94%	5%	5%

・葉菜類のPFAS試験・分析法の開発

多種・多様な葉菜類の中からほうれんそうとキャベツについて様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、ほうれんそうとキャベツは、図2の右列に示す通り、ダイコンやトマト（ミニトマトを含む）と同様に、各試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで3回抽出後、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に純水を加えて15 mLにメスアップし、酢酸でpHを調整し、抽出・精製した。ほうれんそうは、分画後も試料中に残る分析夾雑物除去のため、数回のENVI-Carbを用いた精製工程を繰り返して実施することで安定かつ正確な分析ができた（表7）。そのため、上記の分析法を、本研究課題「2-（1）農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査」にて葉菜類（ほうれんそう、キャベツ）のPFASの分析に適用した。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表7. 葉菜類（ほうれんそうとキャベツ）のPFAS試験・分析法における主要4種PFAS化合物（グループ1化合物）内部標準物質（0.2 ng/g）の回収試験結果

ほうれんそう (N=3)					キャベツ (N=3)				
グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数 (CV値)	グループ1化合物	内部標準化合物	平均	標準偏差	変動係数 (CV値)
	PFHxS	99%	12%	12%		PFHxS	121%	26%	22%
	PFOS	85%	7%	9%		PFOS	100%	3%	3%
	PFOA	99%	3%	3%		PFOA	118%	15%	13%
	PFNA	106%	1%	1%		PFNA	107%	17%	16%

6) 現時点における令和6年度達成目標から見た問題点と令和7年度の達成目標

今年度は、米の調査が緊急案件であったため、本来の予定であったいも類を含む根菜類の分析法の開発に加えて、米の分析法に関しても有効な方法の開発に成功した。この方法により、我が国の主食である米におけるPFASの分子種とその濃度を正確かつ安定に分析できる体制が構築された。

一方、同じグループの農作物であっても試料に含まれる分析夾雑物の種類やその濃度が異なることから、本課題の目的である「農作物に適したPFASの分析法の確立」の観点からは、農作物のグループごとに分類して分析法を開発するよりも、各々の農産物に最適化した個別の分析法の開発が望ましいと考えられる。今後、「農作物に適したPFASの分析法」のマニュアルを作成する際は、この点を考慮して進める予定である。

令和7年度は、課題「1－(2) 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価」にて、米と根菜類（いも類を含む）のPFAS分析法の外部検証を行うための暫定マニュアルを作成する。また、果菜類及び葉菜類のPFASに最適な試験・分析法の高度化を目的として、試験対象作物の種類を増やして実施する。

7) 最終目標の達成見込み

「土壌中多成分PFAS一斉分析法」に続き、「農業用水中多成分PFAS一斉分析法」の開発に成功しており、国内外のPFAS調査や行政施策に早期に役立つことが見込まれている。さらに、我が国の主食である米に加え、大半の指定野菜について安定かつ正確なPFAS分析ができる手法を作成し、各種農作物のPFAS分析の道筋を作った。本分析法の開発の成果は、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農作物へ移行する際の移行の程度を解明し、農産物由来のPFAS摂取に係るリスク管理に資する情報を提供するという目標達成に向け大きく前進していると言える。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	1 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
実行課題名	(2) 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・亀山真由美		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	産総研 環境創生研究部門・環境計測技術研究グループ・谷保佐知 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、小野順子、伴野有彩 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村千里 アジレント・テクノロジー社・ラボラトリーソリューション本部・城代 航、滝埜昌彦 島津製作所社・分析計測事業部・小林まなみ、岩佐奈実、前島希 日本ウォーターズ社・学術本部・岩田敏明、小寺和樹 島津テクノリサーチ社・環境事業部・高菅卓三、柴山 基、醍醐ふみ 日本食品分析センター・河野洋一、座間俊輔、猪之鼻修一、森田真由美		

II. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

農業環境及び農作物中のPFASの分析法を、高精度で信頼性の高いものとするため、分析機器メーカーを含む複数の機関で評価・検証する。

2) 研究進捗状況

昨年の「土壌中多成分PFAS一斉分析法」に続き、課題1－(1)で作成した農業用水の新規分析法の公開、普及に向けて、本課題参画機関に外部機関を加えた計24機関参加の室間共同試験により、分析法の精度管理試験を実施した。また、米及び根菜類に関しては、担当機関への農作物のPFASの一斉分析法の技術移転のため、ワークショ

ップを開催した。従って、本課題は順調に進んでいると言える。

3) 令和6年度の達成目標

1-(1)で考案された農業用水の新規分析法を高精度で信頼性の高いものとするため、令和5年度に確認した30種のPFAS分析に関する参画各機関の測定可能範囲と精度に基づき、検証を行う。

4) 令和6年度研究方法

「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験」のため、30種のPFASを含む不溶物の多い試験用水試料（10 L程度）を調製、よく混和し、試料瓶（50 mL PP遠沈管）に分注して試験用試料を作製した。本試料は不溶物を含むため、各試料瓶間で試料が均一であるかどうかについて検証が必要であると考えられる。そこで、多数の試験用試料からランダムに10本を選び、1試料ごとに10 mLずつをとり、課題1-(1)で考案された農業用水の新規分析法に従い3回の分析を実施して、試料間の検出分子種や濃度の変動について検証した（均一性試験）。

この試験用試料を用いて、農研機構、大阪府環農水研、兵庫県環境研、アジレント・テクノロジー社、島津製作所社、日本ウォーターズ社、島津テクノリサーチ社、日本食品分析センターの8機関に加えて、外部機関を含めて計24機関参加の共同試験を実施した。農研機構から各機関に、試験用試料5本、30種のPFASを含む検量線作成用標準溶液7点（0.002、0.01、0.05、0.2、1、5、10 ng/mL）、内部標準（サロゲート）10 ng/mL、リカバリテスト用標準（非標識PFAS）10 ng/mL、QC用溶液（サロゲートと非標識PFAS）1 ng/mLを配付した。

また、分析実施者が支障なく試験を実施できるよう、各機関に「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法」のマニュアル、分析工程作業シート、試験操作参考動画を提供した。

分析においては、「土壌中PFAS一斉分析暫定マニュアル」に記載したLC分離カラムであるZORBAX Eclipse Plus C18、ACQUITY UPLC BEH C18、Shim-pack GIST-HP C18、BetaSil C18に加えて、InertSustain AQ-C18、Phenomenex Kinetex EVO C18と、固相カラムとしてWaters社のOasisWAX、アジレント社のBond Elute PFAS WAXとGLサイエンス社のInertSep WAXを追加し、これらの中から選択して実施した。分析条件についても、マニュアルに従って各機関が保有する装置ごとにパラメータを選択して測定を行った。

米及び根菜類（いも類を含む）に関しては、参画機関である大阪府環農水研、日本食品分析センターに加えてFAMICが参加したワークショップを実施し、担当機関への分析手法の技術移転を含め、農作物のPFASの一斉分析法普及のための予備的検討を行った。

5) 令和6年度研究結果

図1に示した農業用水における多成分PFAS一斉分析法の分析工程に従い、試験用試料ごとの均一性試験（N=30）、及び試験用試料（N=10）を用いた室間共同試験を実施した。

均一性試験の結果、本試験の試料は新規分析法に適用可能な良好な試料であることがわかった（課題1-(1)表1を参照）。すなわち、*N*-MeFOSAと*N*-EtFOSAを除いた多成分PFASについて、安定かつ高いサロゲートの回収率と、安定したPFAS定量値が得られることがわかった。土壌と同様に、FOSAはスルホン酸基の2つの酸素元素が分子内水素結合しているため安定的に抽出、精製できると考えられるが、*N*-MeFOSAと*N*-EtFOSAの場合、スルホン酸基の2つの酸素のうち、1つの酸素は分子内水素結合するが、残りの酸素はメチル基及びエチル基によって分子内の水素と距離が離れて水素結合できず、そのため、酸素の非共有電子が水中の不溶物（土壌粒子など）に含まれ

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

ている遷移金属などと強く結合し、回収率が低下すると考えられる。この仮説を試験的に立証することは難しいが、土壌、底質試料においても共通して確認されることから、将来解明すべき課題と考えられる。

「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験」ではLC分離カラムと固相抽出カラム（WAX）としてそれぞれ6種、3種を利用可としたことで分析実施機関の試験資材の選択幅が広がり、ユーザーの利便性を向上できた。

試験報告書から、異なる試験室で分析を行っても同様の定量値が得られており（図4、表8）、課題1－（1）から提案された農業用水及び環境水の新規分析法は、ISOやEPA法に対し、不溶物を含む農業用水の分析法として実用段階に達していると言える。つまり、水田の農業用水及び環境水のような水試料の多成分PFASの定性・定量分析において、本法は大いに貢献できる可能性を示した。

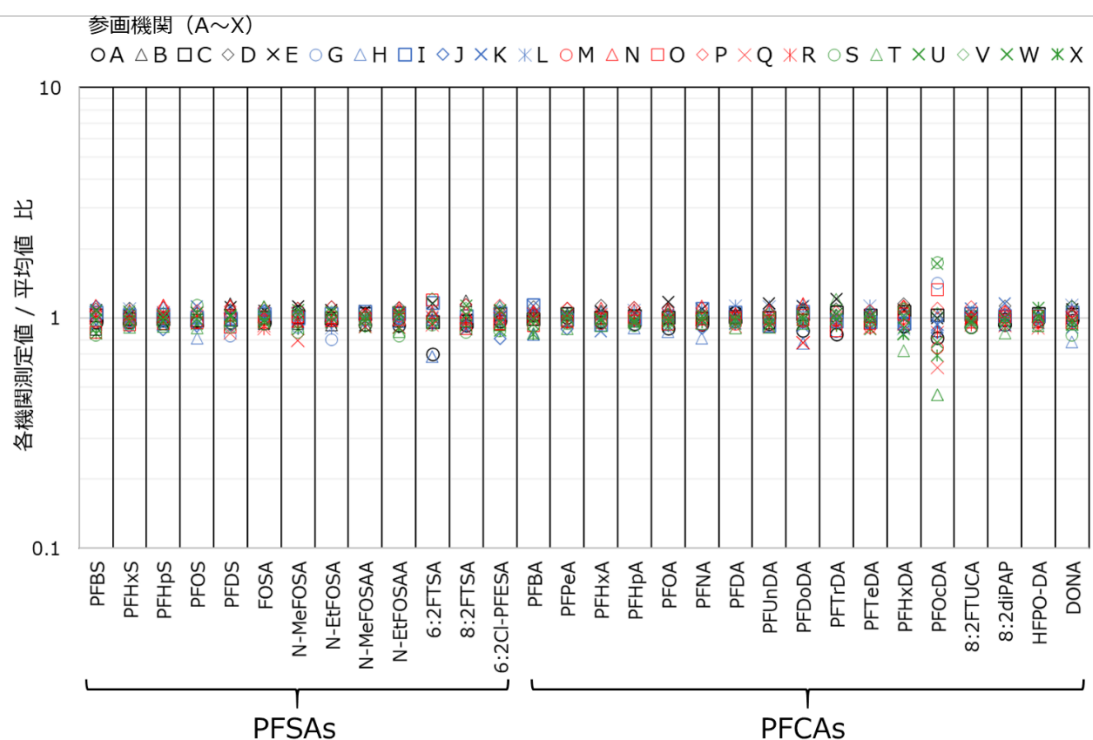


図4. 「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験」参画機関の各化合物の測定値/平均値（外れ値除外）

図中のA～Xのアルファベットは、23参画機関を示す。機関Fについては、本資料作成時に結果が返送されていなかったため、記載していない。この試験結果のばらつきを、各機関測定値の全体平均値との比として示した。具体的には、30種のPFASについて、参画機関から提出された本測定用試料の測定値を、全機関による平均値で除した。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表8. 「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法」の共同試験の性能データ
（農研機構のほか、国内23機関が参画）

PFASs										
	参画機関数 (データセット数)	分析機関数	外れ値割合	平均値	再現性標準偏差	再現性変動係数	検出/性標準偏差	検出/性変動係数		
	l	n	o %	$\bar{x}$ ng/L	s_R ng/L	CV_R %	s_r ng/L	CV_r %		
PFASs	PFBS	23	77	1.3%	10.57	0.84	7.9%	0.34	3.2%	JCV-7
	PFHxS	23	74	5.1%	10.47	0.87	8.3%	0.42	4.0%	
	PFHpS	23	74	5.1%	11.04	1.40	12.6%	0.39	3.5%	
	PFOS	23	78	0.0%	10.10	0.99	9.8%	0.37	3.7%	
	PFDS	23	75	3.8%	10.46	1.10	10.6%	0.42	4.1%	
	FOSA	23	71	9.0%	9.88	2.63	27.5%	0.69	8.1%	
	N-MeFOSA	23	70	10.3%	10.00	2.44	25.4%	0.61	7.5%	
	N-EtFOSA	23	72	7.7%	10.67	2.04	19.9%	0.37	3.6%	
	N-MeFOSAA	23	75	3.8%	10.43	1.19	11.3%	0.38	3.4%	
	N-EtFOSAA	23	66	15.4%	10.66	7.52	57.2%	1.57	8.9%	
	6:2FTSA	23	74	5.1%	10.44	1.31	13.0%	0.58	5.3%	
	8:2FTSA	23	76	2.6%	10.18	0.97	9.5%	0.35	3.4%	
	6:2C11FESA	23	73	6.4%	27.80	8.15	27.7%	1.02	3.3%	
	PFBA	23	68	12.8%	20.79	2.33	11.3%	0.50	2.5%	
	PFHxA	23	68	12.8%	16.09	1.52	9.5%	0.38	2.4%	
	PFHxIa	23	75	3.8%	13.68	0.95	6.9%	0.40	2.9%	
	PFHpA	23	73	6.4%	12.76	1.22	9.6%	0.48	3.7%	
	PFCA	23	77	1.3%	11.78	1.01	8.6%	0.42	3.7%	
	PFNA	23	76	2.6%	11.22	0.92	8.2%	0.37	3.3%	
	PFDA	23	75	3.8%	11.21	1.44	13.1%	0.37	3.5%	
PFCA	PFUnDA	23	77	1.3%	11.11	1.18	10.7%	0.36	3.3%	
	PFDoDA	23	71	9.0%	10.62	2.14	20.9%	0.46	4.9%	
	PFTeDA	23	71	9.0%	11.00	1.69	15.9%	0.48	5.0%	
	PFTeDA	23	75	3.8%	10.52	1.60	15.5%	0.45	4.4%	
	PFHxDA	23	70	10.3%	11.57	5.10	39.6%	0.74	5.3%	
	PFODA	23	68	12.8%	10.69	1.46	13.9%	0.41	4.3%	
	8:2FTUCA	23	73	6.4%	10.74	1.58	14.7%	0.49	4.5%	
	8:2dPAP	23	72	4.0%	15.07	1.83	12.0%	0.58	3.7%	
	HFPO-DA	22	76	2.6%	10.22	1.13	11.2%	0.31	3.1%	
	DONA	23	68	12.8%	0.96	0.15	15.7%	0.04	4.0%	

l	外れ値除去後の実験室の数	s_R	再現性の標準偏差
n	外れ値除去後の個々の試験結果の数	CV_R	再現性の変動係数
o	外れ値の割合	s_r	再現性の標準偏差
$\bar{x}$	外れ値を除いた結果の全体平均	CV_r	再現性の変動係数

6) 現時点における令和6年度達成目標から見た問題点と令和7年度の達成目標

農業用水の分析法については、昨年実施した「土壤中多成分PFAS一斉分析法」の室間共同試験を通し、参画機関の分析実施者へ多成分PFAS一斉分析に係る技術移転が完了していたことから、マニュアルと試験動画の提供のみで試験の実施が可能であった。

一方、農産物に関しては、コンソーシアム内で食品分析に対応可能な機関は限られていることから、今後外部機関の参画を呼びかけるか、外部依頼分析によるクロスチェックに対応することを検討する予定である。

また、令和7年度は昨年度実施した「土壤中多成分PFAS一斉分析法」の室間共同試験に続き、共通の標準希釈試薬を用いた国内24機関の参画による「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験」も順調に進んでいることから、農業用水中のPFAS分析の暫定マニュアルの公開・普及のための手続きに努め、事業を加速化する予定である。また、課題1－（1）で予定されている米と根菜類（いも類を含む）の暫定マニュアルの作成に加えて、果菜類及び葉菜類に適した分析法の開発のための室間共同試験に必要な試料作製等を行う。

7) 最終目標の達成見込み

農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価のため、「土壤中多成分PFAS一斉分析法」に続き、農業用水に適した分析法確立の準備ができた。このことから、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農作物へ移行する際の移行の程度を解明し、農産物由来のPFAS摂取に係るリスク管理に資する情報を提供するという目標達成に向け大きく前進していると言える。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題*番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	2 各種農作物へのPFAS移行特性の解明		
実行課題名	(1) 農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者名等	農研機構 農環研・土壌資源・管理グループ・前島勇治 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、伴野有彩 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村千里		

II. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

国内の2か所以上の農地を含む高濃度PFAS土壌を用いて、その土壌、農業用水、大気中のPFAS濃度及び、その環境下で栽培された3品目以上の農作物中のPFASについて調査し、農作物に移行しやすいPFAS分子種を特定するとともに、その移行特性を調べる。

2) 研究進捗状況

課題2-(1)では、農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査のため、PFASの分子種や濃度分布が異なる2か所の水田(A地区、B地区)と、それらと地域の異なる2か所の畑地圃場(C地区、D地区)で試験を実施した。本年度は米に対する試験を追加し、土性が異なる2か所の水田地区にて、課題1-(1)にて開発された土壌、水、米(玄米)の多成分PFAS分析手法を用い、土壌、水、米(玄米)におけるPFASの分子種と濃度を分析した。その結果、分析法の適用性が検証されるとともに、多種・多様なPFASに関し、土壌から米へ、水から米への移行に関する多数の新規知見が得られた。

畑作物に関しては、昨年得られたC地区畑地内の1 mメッシュ45地点の土壌試料調査の結果に基づき、土壌中のPFAS分子種やその濃度を考慮した試験デザインを行って、根菜類(いも類を含む)、果菜類、葉菜類の栽培試験を試行的に実施した。適期に収穫した試料を分析した結果、土壌から畑作物へのPFASの移行に関する知見が得

られたが、次年度以降の検証が必要である。また、主たるPFAS排出源となる施設がないD地区の畑地にて対照試験を実施した。

3) 令和6年度の達成目標

比較的高濃度のPFASを含む農地土壌から農作物へのPFAS移行動態について調査を実施する。本年度は米を栽培して農地土壌から米へのPFAS移行動態を解明する。畑作物は根菜類（いも類を含む）、果菜類、葉菜類について栽培試験を実施し、適期に収穫した試料を分析して土壌から畑作物へのPFASの移行動態を解明する。

農作物（根菜類）の前処理については、皮へ付着した農地土壌の影響について詳細に調べ、付着土壌によりPFAS評価がどのように変動しうるかを明らかにする。

4) 令和6年度研究方法

・米（玄米）中のPFAS動態解明

水田A地区に、水田1区画を1つの試験区とし、13の試験区を設置した。水田B地区では2つの試験区を設置した。それぞれの区画において、図5のように四隅及び中央の5カ所から、表層から深さ約15 cmの土壌を春（栽培前）と秋（栽培後）にメタノールで洗浄したステンレス製の園芸スコップを用いて採取した。米（玄米）試料も土壌採取場所で栽培、収穫したものを分析に供した。水試料は栽培前期と米の成長が活発な夏について、田面水を水尻付近からPP製容器に直接採取した。

全ての試料採取、分析工程は課題1-（1）で作成した土壌、水、米の分析方法に準じて実施した。分析工程は図1（水）、図2左列（米）に示している。

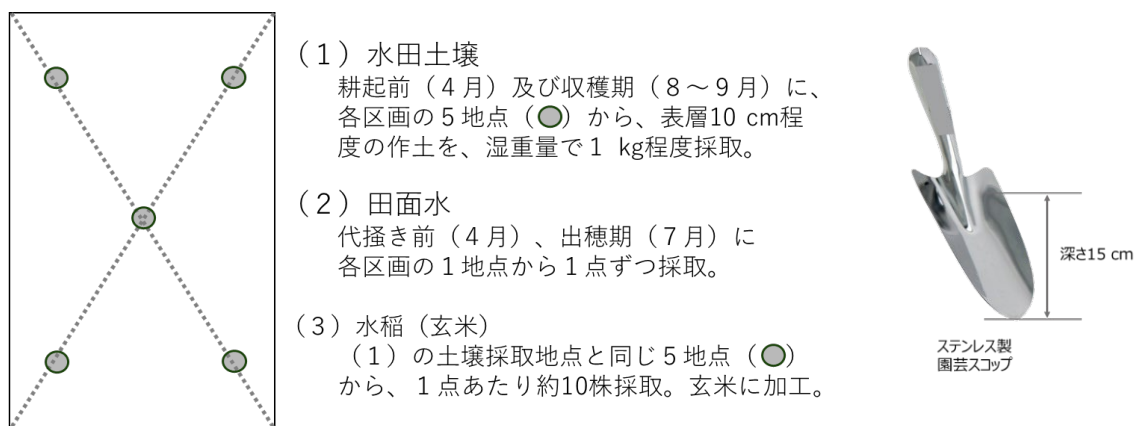


図5. 水田における土壌採取方法と器具

・根菜類（じゃがいも）中のPFAS動態解明

C地区内の畑地の3 m×15 mの試験区において、3畝を耕耘機（刃30 cm、攪拌深さ15～20 cm）で攪拌した後、3つの畝それぞれを5メートルごとに3つに区切って9区域に分け、深さ約15 cmの土壌を約1 kgずつ、メタノールで洗浄したステンレス製の園芸スコップを用いて採取して分析に供した。

C地区及びD地区で試験栽培・収穫されたじゃがいもから、200-230 gの重さの試料を選定した。洗浄の仕方の影響を調べるため、洗わないもの（無洗浄処理）、流水（水道水＋純水）で洗浄したもの、ブラシを用いて流水（水道水＋純水）で洗浄したものについて検討した。それぞれについて、皮つきのじゃがいも、皮を剥いたじゃがいも、皮のみの3種に調製、粉碎して分析用試料とした。なお、じゃがいもの皮は、ピーラーを用いて剥いて得たものを分析に供した。ピーラーで剥いた皮の厚さは1-2 mmであり、じゃがいも全体の重さの7-10%であった。全ての試料採取、分析工程は課題1-（1）で作成した土壌、水、根菜類（じゃがいも）の分析方法に準じて実施した。じゃがいもの分析工程は図2左列に示している。

・根菜類（ダイコン）中のPFAS動態解明

C地区内の畑地における土壌採取はじゃがいもの方法と同様である。C地区及びD地区で試験栽培・収穫されたダイコンの中から、市販されているものと同程度の平均的な重さと長さを持つものを試料として選定した。試料は、水洗浄し、皮つきのダイコン、皮を剥いたダイコン、皮のみの3種に調製、粉碎して、分析用試料とした。なお、ダイコンの皮は、ピーラーを用いて剥いて得たものを分析に供した。ピーラーで剥いた皮の厚さは1-2 mmであった。全ての試料採取、分析工程は課題1-(1)で作成した土壌、根菜類（ダイコン）の分析方法に準じて実施した。ダイコンの分析工程は図2右列で示している。

・果菜類（ズッキーニ、きゅうり、トマト（ミニトマトを含む））中のPFAS動態解明

土壌採取はじゃがいもの方法と同様である。C地区及びD地区で試験栽培・収穫されたズッキーニ、きゅうり、トマト（ミニトマトを含む）の中から、市販されているものと同程度の平均的な重さと長さを持つものを試料として選定した。試料は、水洗浄し、粉碎し、分析用試料とした。全ての試料採取、分析工程は課題1-(1)で作成した果菜類（きゅうり、ズッキーニ）もしくは果菜類（トマト（ミニトマトを含む））の分析方法に準じて実施した。果菜類（きゅうり、ズッキーニ）の分析工程は図2中列で、果菜類（トマト（ミニトマトを含む））の分析工程は図2右列に示している。

・葉菜類（ほうれんそうとキャベツ）中のPFAS動態解明

土壌採取はじゃがいもの方法と同様である。試験栽培後、収穫されたC地区のほうれんそう、C、D両地区のキャベツの中から、市販されているものと同程度の平均的な重さと長さを持つ試料を調査試料として選定した。試料は、水洗浄し、粉碎して分析用試料とした。全ての試料採取、分析工程は課題1-(1)で作成した土壌、葉菜類（ほうれんそう、キャベツ）の分析方法に準じて実施した。葉菜類（ほうれんそう、キャベツ）の分析工程は図2右列に示している。

5) 令和6年度研究結果

・米（玄米）中のPFAS動態解明

水田A地区の水田土壌は、いずれの区画も30種のPFASのうち、パーフルオロカルボン酸類（PFCAs）のPFOAが顕著に高く、パーフルオロスルホン酸類（PFSA）は比較的低濃度であった。

栽培前（春）にA地区の13区画の水田から各5点採取（図5参照）した土壌に含まれる各PFAS濃度の平均値を図6に示した。区画ごとに土壌中PFAS濃度は異なるが、区画間で分子種に大きな相違はなく、同一地区での採取時期による差異も大きくはない。たとえば、30種のPFASの合計濃度が最も高かった区画c-1では、5点の平均値について、栽培前（春）は、PFHxSは73 ng/kg-dw、PFOSは462 ng/kg-dw、PFOAは14,076 ng/kg-dw、PFNAは1,084 ng/kg-dwであったが、栽培後（秋）には、PFHxSは57 ng/kg-dw、PFOSは510 ng/kg-dw、PFOAは15,704 ng/kg-dw、PFNAは1,230 ng/kg-dwとなり、栽培前後で濃度が大きく変化するPFASはなく、30種のPFASの合計値の変動も少なかった。

一方、田面水については、13区画の各水田の水尻1か所から採取したため、試料数が土壌に比べて少ないが、区画c-1とc-2、d-4においては、栽培前（春）と栽培途中（夏）で30種のPFASの合計濃度に大きな変化が認められた。すなわち、最大値を示した区画c-1では、栽培前（春）のPFHxSは9.8 ng/L、PFOSは8.7 ng/L、PFOAは2,812 ng/L、PFNAは73.1 ng/Lであったのに対し、栽培途中（夏）に採取した田面水のPFHxSは1.2 ng/L、PFOSは1.4 ng/L、PFOAは391 ng/L、PFNAは9.3 ng/Lとな

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

り、PFAS濃度は著しく減少していた（図7）。これは、当該区画で農業用水路の整備を実施しており、PFAS排出源対策の効果が表れた可能性がある。注目すべき点として、水路の改修工事によって田面水中のPFASは大きく減少しているが、土壌中のPFASにおいては効果が明確ではなく、PFASが土壌へ強く吸着し残留していることが考えられた。

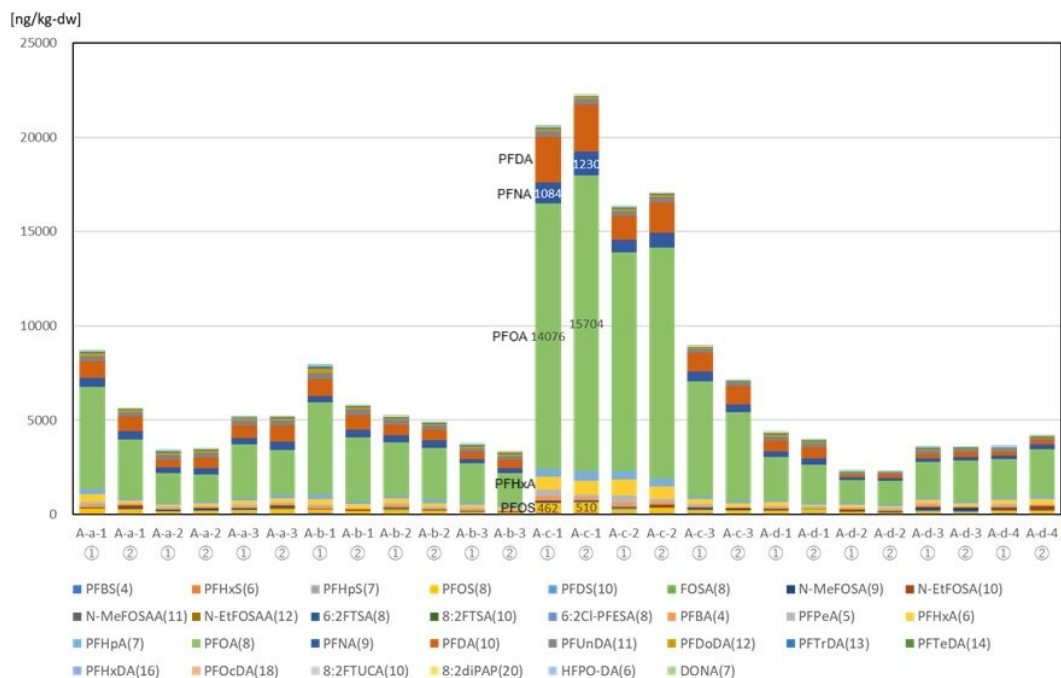


図6. 水田A地区13区画における春(①)と秋(②)の土壌中のPFAS分子種と濃度

各区画について、採取した5点の平均値を示す。区画ごとに土壌中PFAS濃度は異なるが、分子種に大きな相違はなく、採取時期による差異も大きくはない。PFAS名称の後ろの括弧内の数字はPFASに含まれる炭素の数を示す。

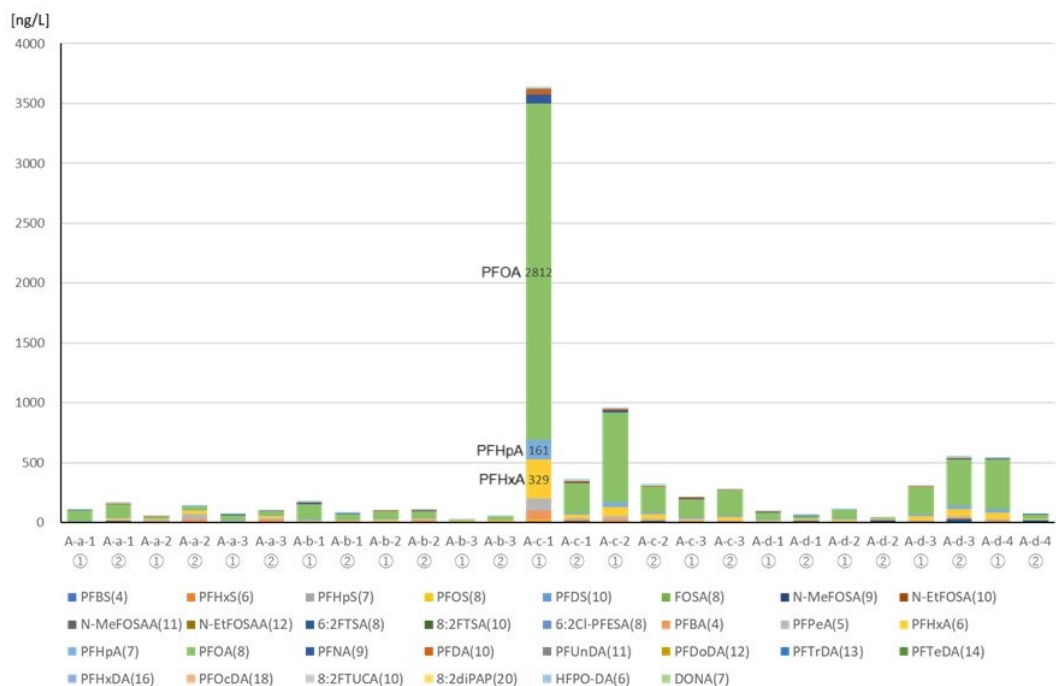


図7. 水田A地区13区画における春(①)と夏(②)の田面水中のPFAS分子種と濃度

PFAS名称の後ろの括弧内の数字はPFASに含まれる炭素の数を示す。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

水田A地区の13区画で栽培・収穫した米（玄米）（5地点の平均値）に含まれるPFASを図8に示した。米（玄米）におけるPFASに関しても、パーフルオロカルボン酸類（PFCAs）の方がパーフルオロスルホン酸類（PFSA）より多く検出されている（図8）。特に、水溶解性が高い短鎖PFCAsの割合が高く、なかでも、PFBA（C4）が著しく高かった。水田A地区の米（玄米）試料については、全63点（13区画のうち1区画の2地点で倒伏のため試料採取できなかったため試料数は65点より2点少ない数となった）の分析結果では、PFBA濃度は最大値325 ng/kg、最小値26 ng/kg、中央値86 ng/kgとなった。主な分子種としてその他に、PFHxA（C6）やHFPO-DA（C6）（HFPOダイマー酸及びそのアンモニウム塩）が検出され、PFHxA；144 ng/kg（最大値）、12 ng/kg（最小値）、20 ng/kg（中央値）、HFPO-DA；39 ng/kg（最大値）、9 ng/kg（最小値）、30 ng/kg（中央値）であった。なお、HFPO-DAはGenX（商標）とも呼ばれ、PFOAの代替として開発された化学物質である。

一方、主要4種PFAS（PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA）については、PFHxSが63試料中1試料のみで定量下限値（4 ng/kg）を越えて検出され、4 ng/kgであった。PFOSは63試料中定量下限値（9 ng/kg）を越えて検出されたものはなかった。PFOAは、63試料中61試料で検出され（定量下限値2 ng/kg）、最大値20 ng/kg、最小値2 ng/kg、中央値5 ng/kgとなった。PFNAに関しては、63試料中定量下限値（12 ng/kg）を越えて検出されたものはなかった。

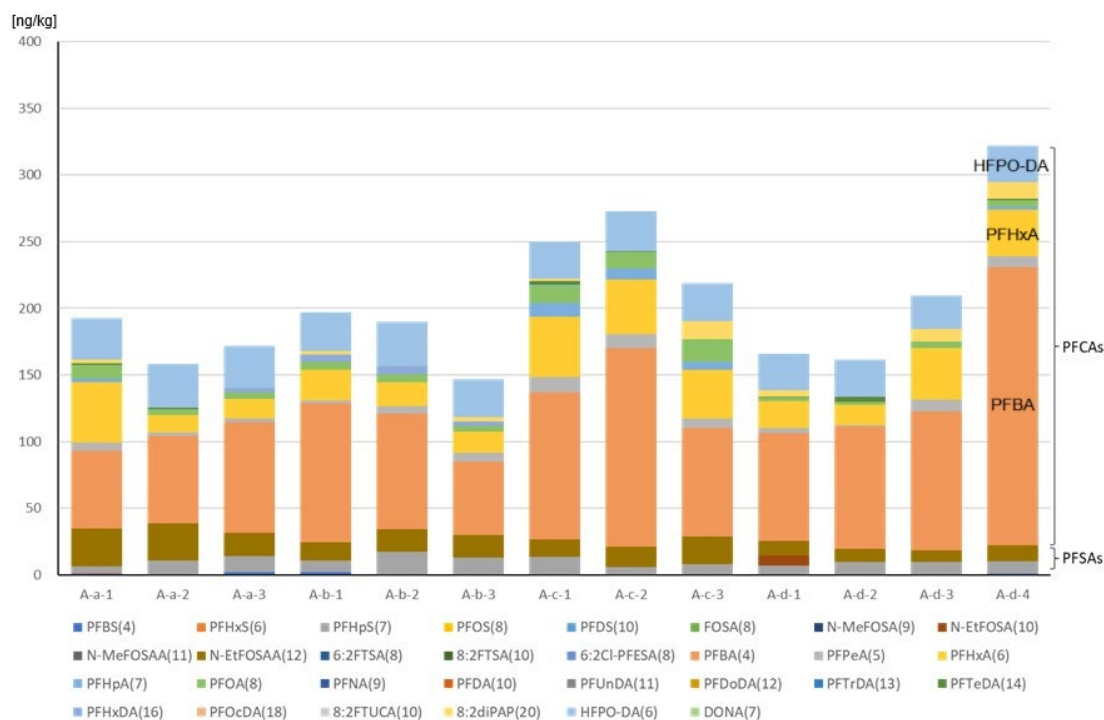


図8. 水田A地区13区画における米（玄米）中のPFAS分子種と濃度
各区画で栽培・収穫した5点の平均値を示す。

PFASの土壌や水から米（玄米）への移行を検討するため、米（玄米）、土壌、水中すべてから検出されたPFOAとPFBAについて、各区画の米（玄米）の濃度に対する土壌（春・秋）と水（春・夏）の濃度をプロットした。米（玄米）と土壌は5点の平均値、水各区画1点のデータを用いた。その結果、PFOAでは、米（玄米）の濃度は、水よりも土壌との相関の方が高い傾向があった（図9）。PFBAでは、水・土壌とも明確な相関は認められなかった（図10）。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

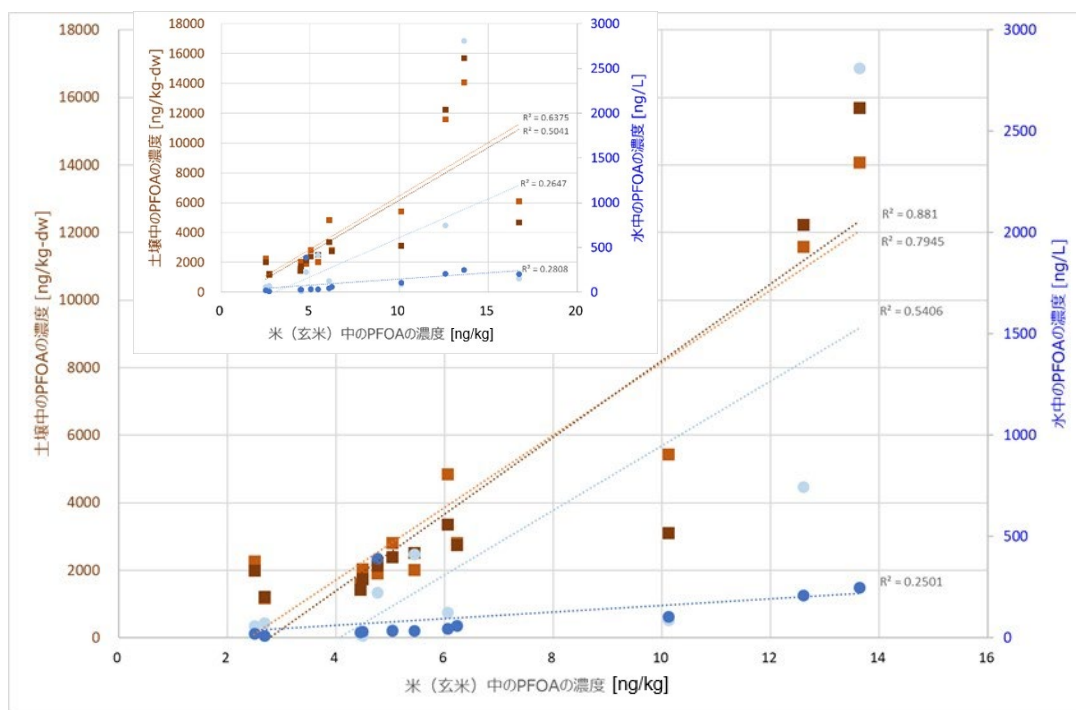


図9. 水田A地区の各区画の米（玄米）のPFOA濃度と、土壌（春■、秋■）と水（春●、夏●）に含まれるPFOA濃度との関連
最大値を示した米（玄米）のデータを除外してプロットした。挿入図は、最大値を示した米（玄米）を含め、全てのデータをプロットしたもの。

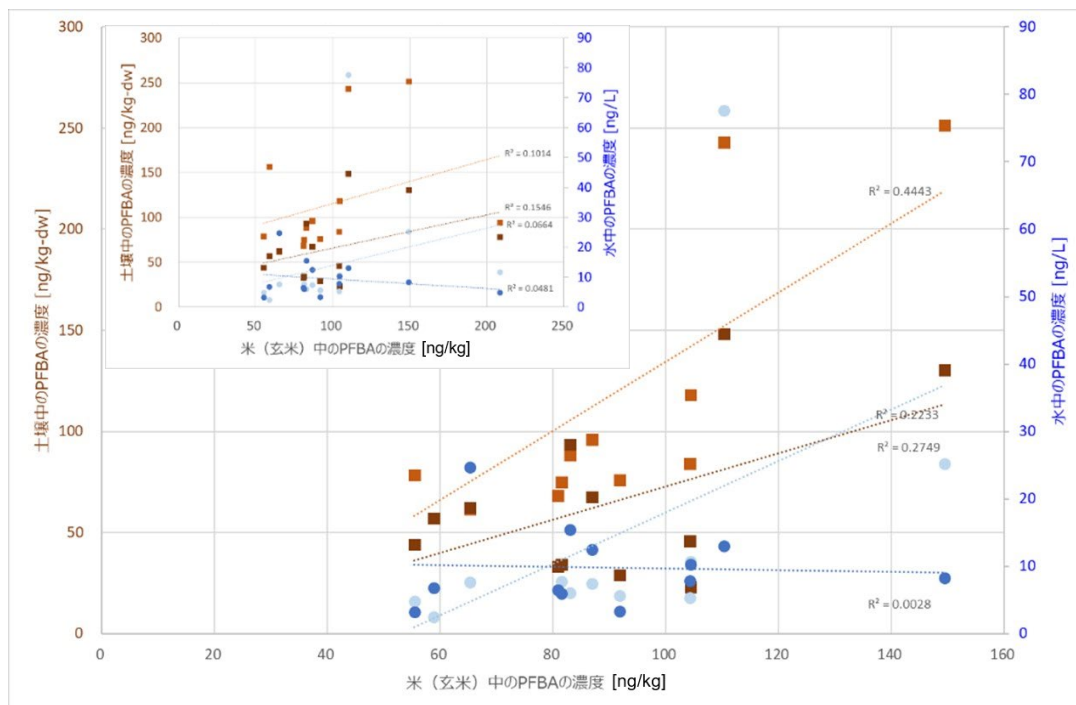


図10. 水田A地区の各区画の米（玄米）のPFBA濃度と、土壌（春■、秋■）と水（春●、夏●）に含まれるPFBA濃度との関連
最大値を示した米（玄米）のデータを除外してプロットした。挿入図は、最大値を示した米（玄米）を含め、全てのデータをプロットしたもの。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

水田A地区の米（玄米）に関し、30種のPFASについて〔米中の濃度/土壌中の濃度〕を算出し比較した。PFOAについては、土壌に対する米中の濃度の割合は小さく、土から米（玄米）に移行しにくいことが示唆された（図11）。土壌（春及び秋）と水（春と夏）と玄米に関する主成分分析（PCA）の解析結果からも、玄米は第一主成分（PC1）で農地土壌と分離せず、水（田面水）とは分離していることから、農地土壌に影響を受ける傾向を示している（図12）。しかし、より正確に玄米中の多種多様なPFASの吸収移行を調べるためには、土壌中の水に溶解しているPFASが根を経て移行することに着目した評価が必要であり、今後明らかにすべき課題である。

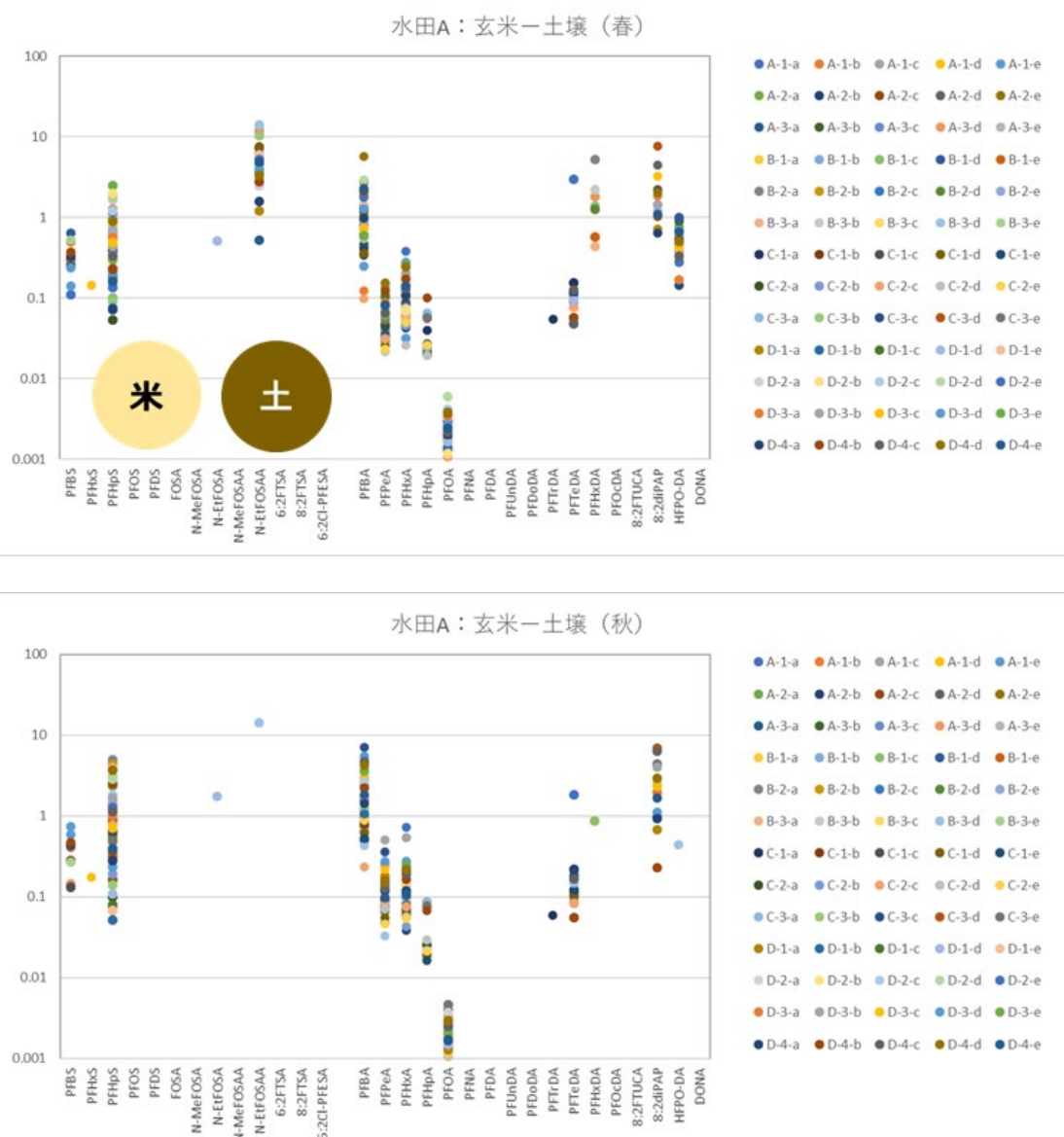


図11. 水田A地区の土壌に対する米（玄米）中のPFAS濃度の比率

30種のPFASについて、〔米中のPFAS濃度〕/〔土壌中のPFAS濃度〕（縦軸）をプロットした。上段は耕起前（春）の土壌との比、下段は収穫期（秋）の土壌との比を示す。凡例のA-1-a等は、試料番号をラベルしたものである。玄米または土壌中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

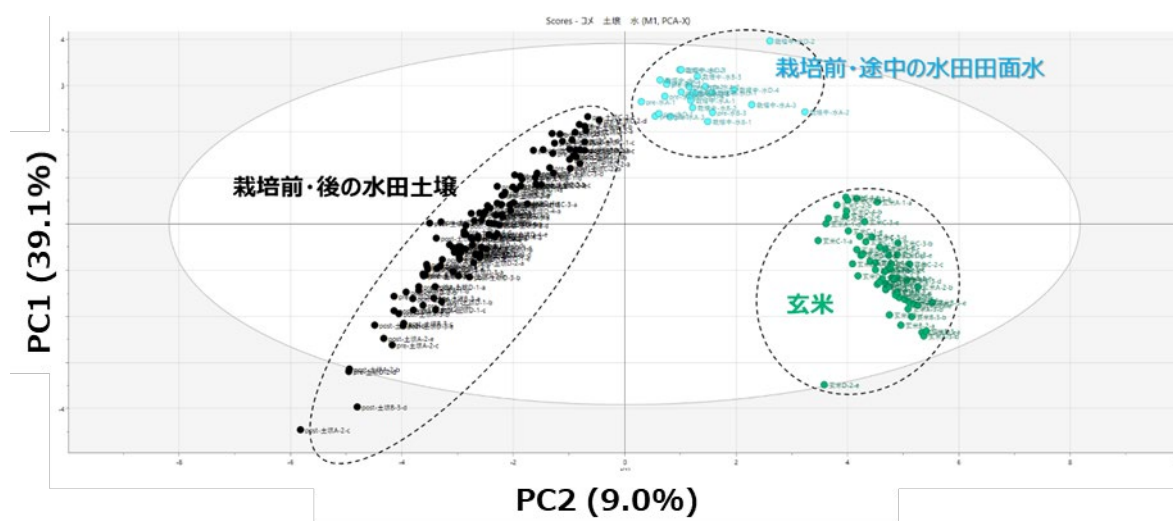


図12. 水田A地区の農地土壌、田面水及び米(玄米)の主成分分析(PCA)
第1主成分(PC1)及び第2主成分(PC2)からなる主成分得点プロット。

一方、水田B地区の試料は水田A地区と全く異なったPFAS組成を示した。すなわち、水田B地区は、パーフルオロスルホン酸類 (PFASs) のPFOSが顕著に高く、パーフルオロカルボン酸類 (PFCAs) は比較的低濃度の土壌であった。

水田B地区も水田1区画を一つの試験区とし、2つの試験区B-aとB-bを設定した。栽培前(春)と収穫時(秋)に2区画の水田内からそれぞれ5点採取(図5参照)した土壌の平均値を図13上段に示した。区画B-a、B-bともに測定した土壌中のPFASの濃度に採取時期の違いによる大きな差はなかった。田面水については、栽培前(春)と成長期(夏)で区画B-a、B-bともにPFBAの増加が認められた(図13下段)。

区画B-aの土壌中のPFAS濃度の5点の平均値について、栽培前(春)においては、PFHxSは1,276 ng/kg-dw、PFOSは4,514 ng/kg-dw、PFOAは292 ng/kg-dw、PFNAは951 ng/kg-dwであり、収穫時(秋)においては、PFHxSは946 ng/kg-dw、PFOSは5,070 ng/kg-dw、PFOAは359 ng/kg-dw、PFNAは1,006 ng/kg-dwであった。栽培前後の各PFASの濃度の変動は少なかった。区画B-bにおいても栽培前後で大きな変動はなかった。

田面水に関しては、栽培前(春)に13区画の水田内の水尻1か所から採取した田面水について、区画B-aでは、PFHxSは43 ng/L、PFOSは70 ng/L、PFOAは9 ng/L、PFNAは28 ng/Lであり、栽培途中(夏)に採取した田面水においては、PFHxSは44 ng/L、PFOSは65 ng/L、PFOAは13 ng/L、PFNAは25 ng/Lであった。春と夏での田面水の各PFAS濃度の変化は少ない(春と夏の濃度の比は0.7~1.5程度)が、短鎖カルボン酸類は2倍程度、特にPFBA濃度は10 ng/Lから44 ng/Lと高くなっていた。区画B-bでも同様の傾向が認められた。試料数が少ないこともあり、この理由は不明である。

米(玄米)におけるPFASに関しては、水田A地区の結果と同様に、パーフルオロカルボン酸類 (PFCAs)の方がパーフルオロスルホン酸類 (PFASs)より多く検出されている(図13下段)。特に、短鎖PFCAsの濃度が高く、なかでもPFBA(C4)が高く、全10点の分析結果では、最大値175 ng/kg、最小値74 ng/kg、中央値86 ng/kgとなった。2区画(5点)それぞれの平均値は、B-a区画で87 ng/kg、B-b区画で100 ng/kgとなった。PFHxA(C6)やHFPO-DA(C6)は水田Bでも観測された。それぞれの値は以下の通り。PFHxA; 26 ng/kg(最大値)、16 ng/kg(最小値)、22 ng/kg(中央値)、HFPO-DA; 39 ng/kg(最大値)、14 ng/kg(最小値)、36 ng/kg(中央値)。米(玄米)に含まれるPFASの組成は、農地土壌及び田面水と異なっていた。一方、土壌からPFCAsの方がPFASsより多く検出されている水田A地区で栽培された米(玄米)と、短

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

鎖PFCAsを多く含む類似したPFAS組成を示した。

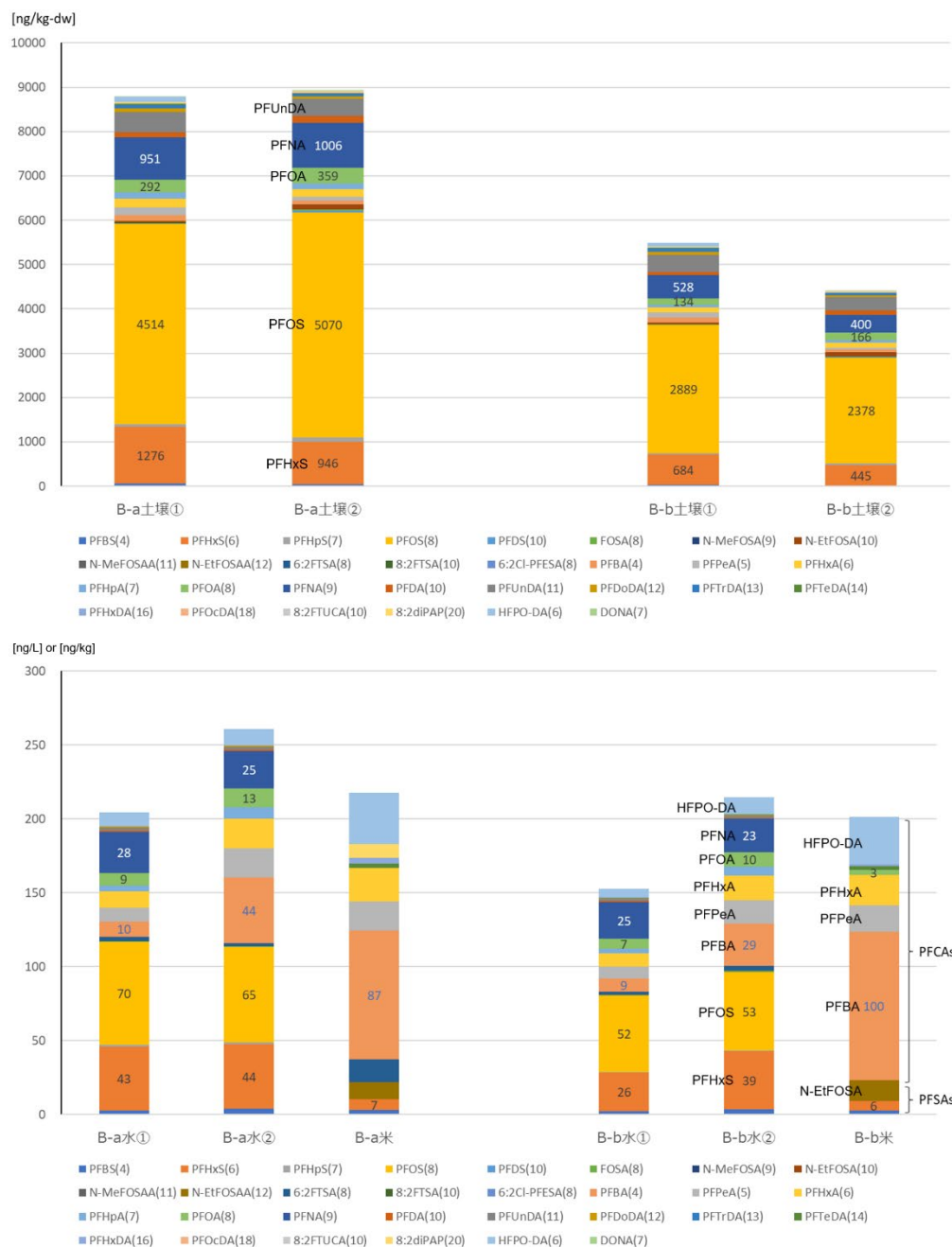


図13. 水田B地区(区画aとb)における春(①)と秋(②)の土壌(上)と水・米(下)に含まれるPFAS

土壌及び米については、各区画で採取した5点の平均値を示す。水田耕起前(春)と収穫時(秋)で、観測されるPFASの分子種・濃度に大きな変化は認められない。米(玄米)に含まれるPFAS種は土壌とも水ともパターン(割合)が異なる。

水田B地区における米(玄米)の主要4種PFAS(PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA)については、PFHxSが10試料中9試料で定量下限値(4 ng/kg)を越えて検出され、平均値は6.8 ng/kgであった。PFOSは10試料中定量下限値(9 ng/kg)を越えて検出されたものはなかった。PFOAは、10試料中1試料で検出され(定量下限値2 ng/kg)、3 ng/kgで

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

あった。PFNAに関しては、10試料中定量下限値（12 ng/kg）を越えて検出されたものはなかった。注目すべき点としては土壌及び田面水中のPFOSが著しく高くても米（玄米）から検出されない点が挙げられる。このことは、根から地上部への吸収移行に関与する移送因子、例えば、Major latex-like protein (MLP)のようなタンパク質の有無が影響している可能性も考えられる。

・根菜類（じゃがいも、ダイコン）中のPFAS動態解明

根菜類（じゃがいも、ダイコン）における移行性に関する基礎的データを得るため、9区画に分けたC地区内畑地の試験区及び、D地区内畑地の農地土壌中のPFAS濃度を調べた（図14）。そのうち平均的なPFAS濃度・組成を示した区画P5にて栽培したじゃがいもについて、洗浄及び剥皮処理後のPFAS濃度を図15及び図16に示した。じゃがいもには炭素鎖の長さが6以下の短鎖カルボン酸が多く含まれ、これらは洗浄や剥皮処理によりほとんど低減しないことがわかった（図15）。一方、短鎖カルボン酸以外のPFASについては、図16に示す通り、洗浄や剥皮により低減することがわかった。じゃがいもを洗浄等で前処理することによって、皮に付着した土壌粒子の影響を一定程度軽減できると考えられ、消費段階では洗浄のような前処理が重要であることが示された。

じゃがいも及びダイコン中のPFASの濃度と、土壌に含まれるPFASの濃度の比率を区画ごとに算出したところ、ほとんどのPFASで1以下であった。じゃがいもの結果を図17に、ダイコンの結果を図18に示す。ダイコンではHFPO-DAの蓄積の可能性が認められる試料も一部あったが、移行性の解明には今後さらなるデータの取得が必要である。

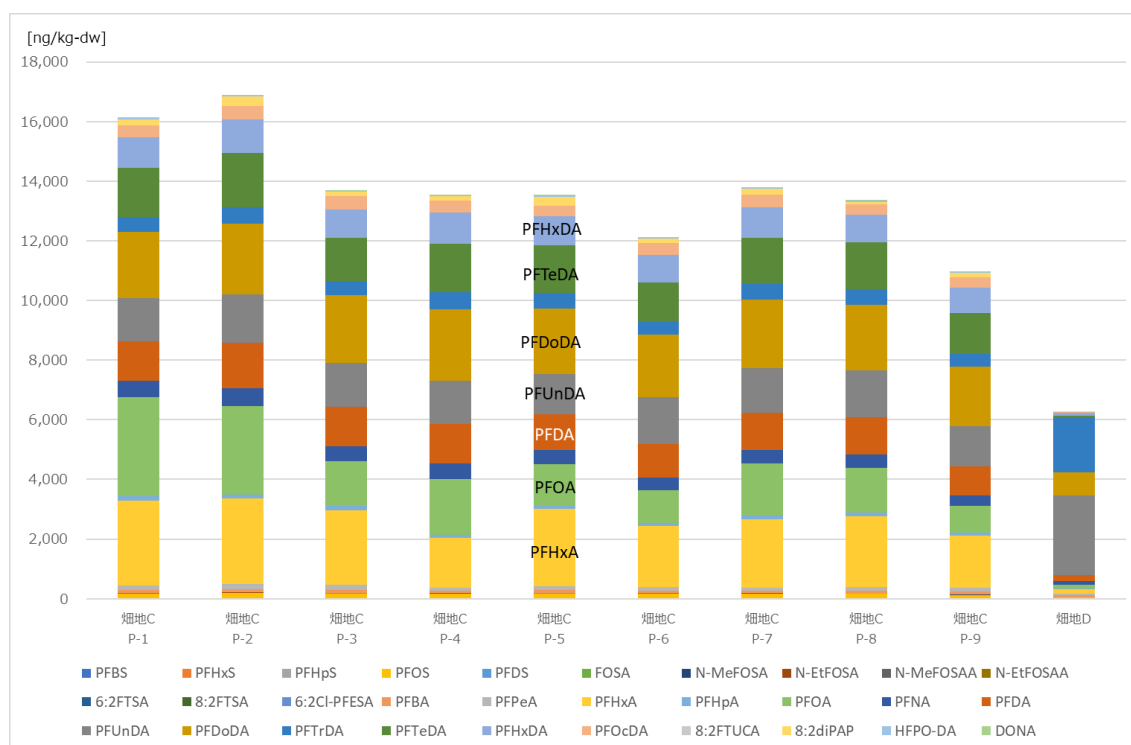


図14. 畑地C（栽培場所P1から9）及び畑地Dの農地土壌のPFAS

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

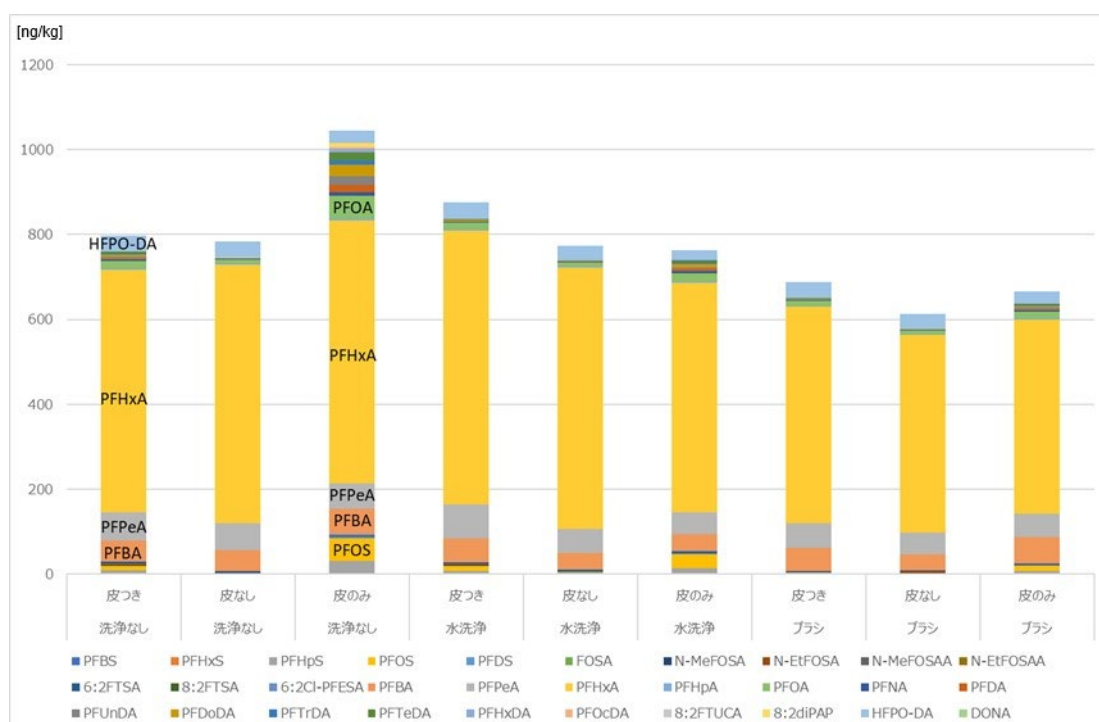


図 15. 畑地Cの栽培場所P5で栽培したじゃがいもの洗浄及び剥皮処理後の30種PFAS濃度

じゃがいもに含まれる30種のPFASの濃度は土壌の1/10程度で、濃度比は土壌と大きく異なり短鎖カルボン酸 (PFBA、PFPeA、PFHxA)、HFPO-DAの割合が多い。

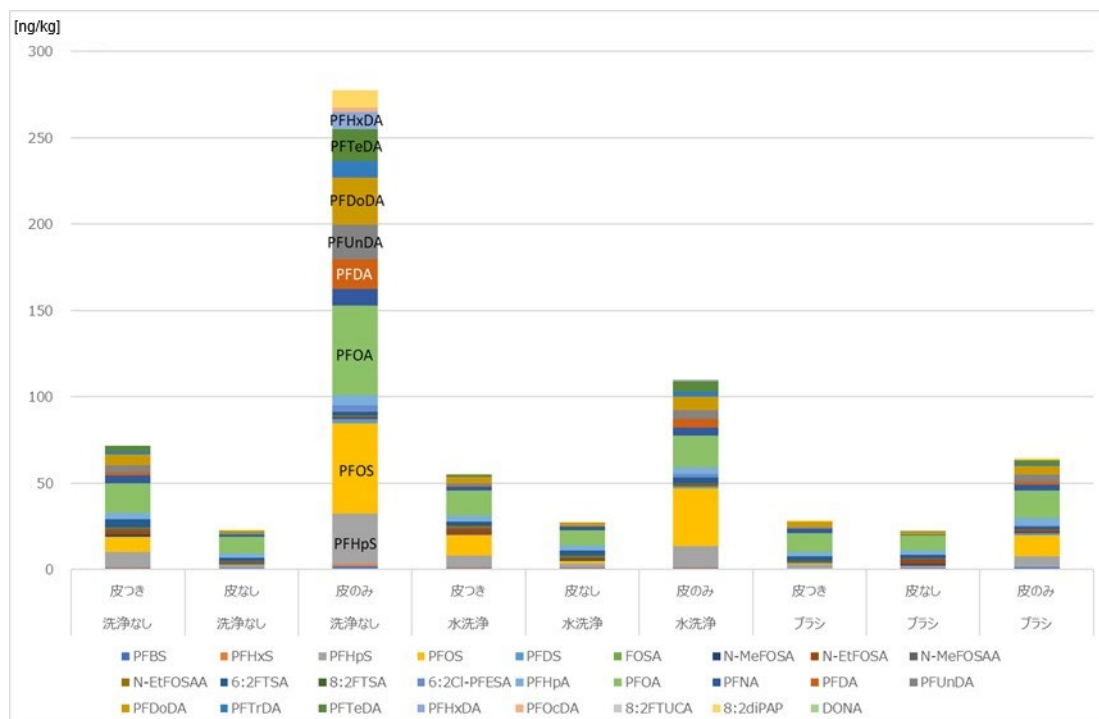


図 16. 畑地Cの栽培場所P5で栽培したじゃがいもの洗浄及び剥皮処理後の短鎖カルボン酸 (PFBA、PFPeA、PFHxA)、HFPO-DA以外のPFASの濃度

短鎖カルボン酸以外のPFASでは、皮つきの場合、洗浄の程度、剥皮の影響が大きい。炭素鎖8以上のカルボン酸類の割合は土壌における割合と類似のパターンを示した。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

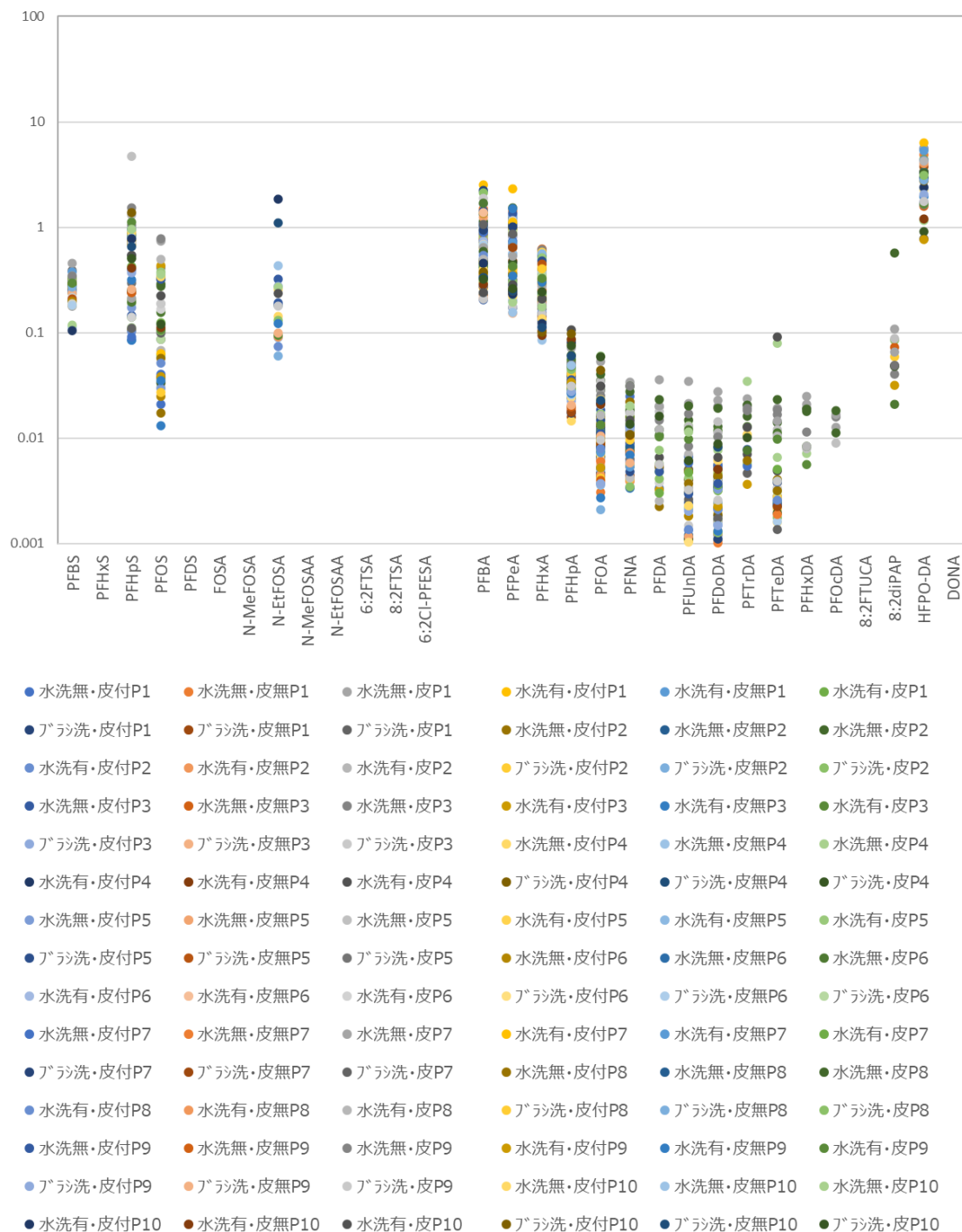


図17. 畑地C(栽培場所P1から9)及び畑地D(P10)のじゃがいもにおけるPFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、[じゃがいも中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度](縦軸)をプロットした。皮付は皮のついた、皮無は剥皮したじゃがいもを、皮は剥いた皮のみを分析した結果を示す。じゃがいも中または土壌中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

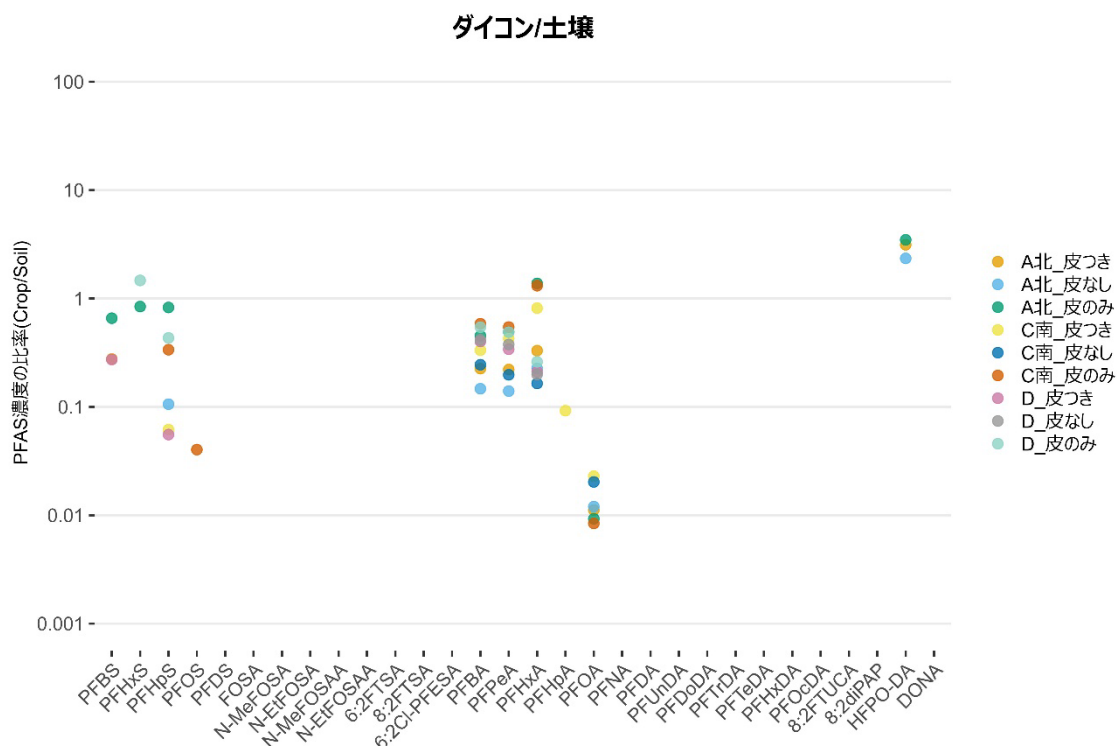


図18. 畑地C(区画AとC)と畑地D(区画D)のダイコンにおけるPFAS濃度と農地土壤中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、[ダイコン中のPFAS濃度]/[土壤中のPFAS濃度](縦軸)をプロットした。凡例の北、南は畑地区画内の栽培箇所を示す。皮つきは皮のついた、皮なしは剥皮したダイコンを、皮のみは剥いた皮のみを分析した結果を示す。ダイコン中または土壤中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

・果菜類（ズッキーニ、きゅうり、トマト（ミニトマトを含む））中のPFAS動態解明

果菜類（ズッキーニ、きゅうり、トマト（ミニトマトを含む））に関し、[作物中のPFAS濃度/土壤中のPFAS濃度]を算出した結果、果菜類においても、PFASの水溶解性が移行の主な因子であることが示唆された。つまり、水に溶解しやすいPFAS分子種が、水を介して果菜類の根から吸収移行されると考えられた。ズッキーニ2品種(PCB等の低分子土壤汚染物質を吸収する品種RAと吸収しにくい品種PG)(図19)、きゅうり(図20)、トマト(ミニトマトを含む)に関しても、HFPO-DAの蓄積が一部の試料で見られた。ズッキーニについては、低分子土壤汚染物質の高吸収品種とされるRAで、土壤中のPFOA濃度に対する作物中のPFOA濃度の比率が小さくなっていた。PFBA(C4)やPFPeA(C5)がトマト(図21)やミニトマト(図22)において濃縮されやすい傾向が見られた。次年度引き続き検討を行う。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

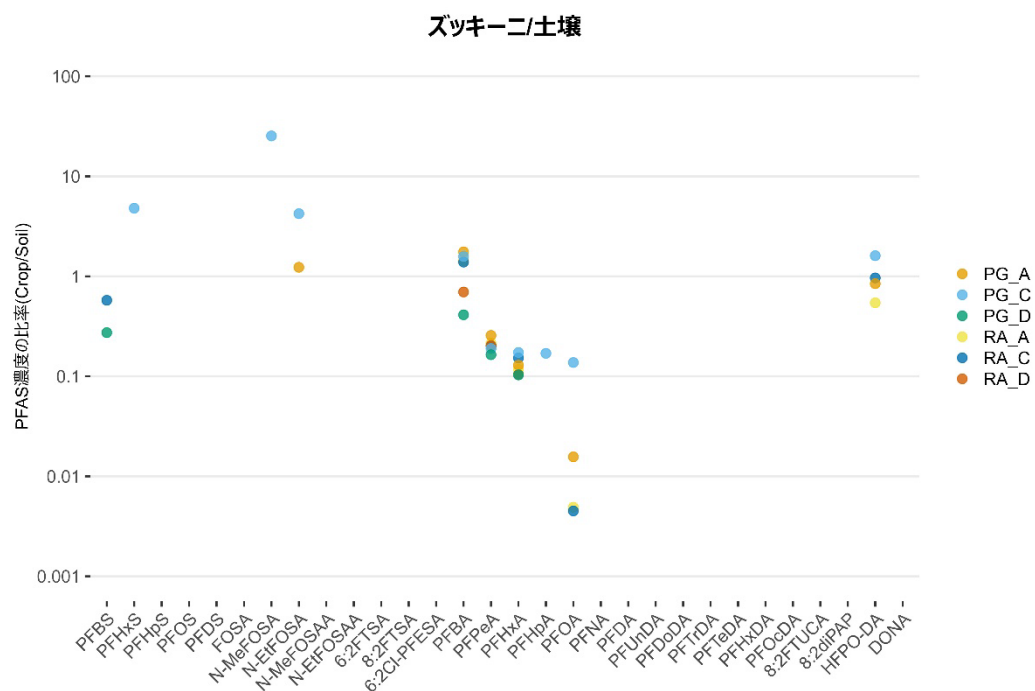


図19. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のズッキーニ中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、[ズッキーニ中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度](縦軸)をプロットした。RA、PGはズッキーニの品種。ズッキーニ中または土壌中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

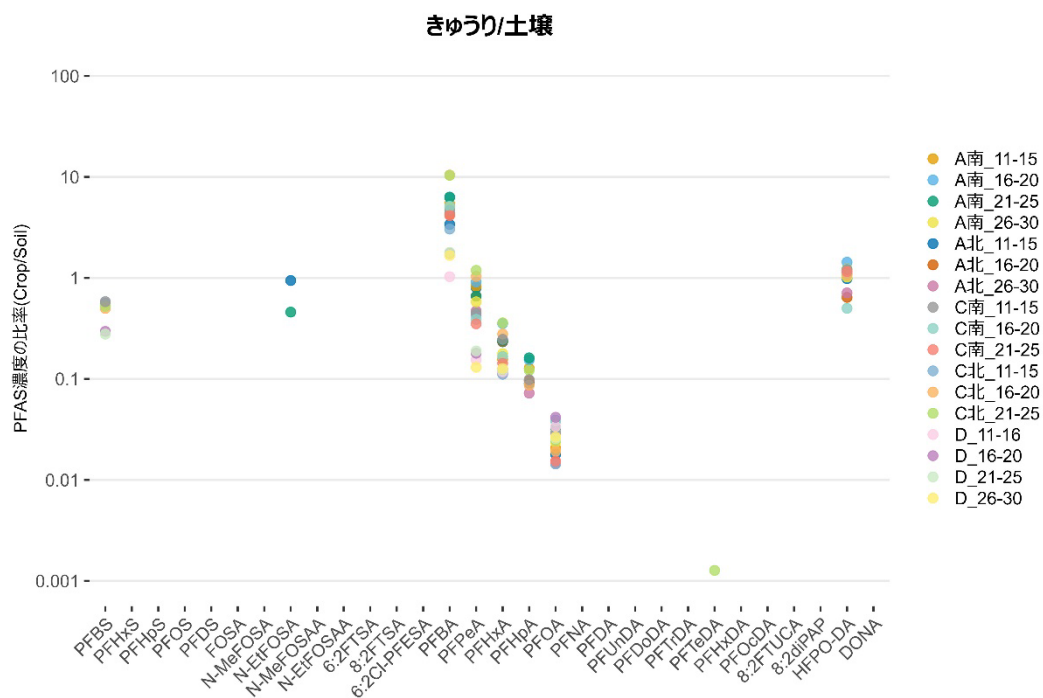


図20. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のきゅうり中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、[きゅうり中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度](縦軸)をプロットした。凡例の北、南は区画内の栽培箇所を示す。11-15等の数字は、試料番号を示す。きゅうり中または土壌中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

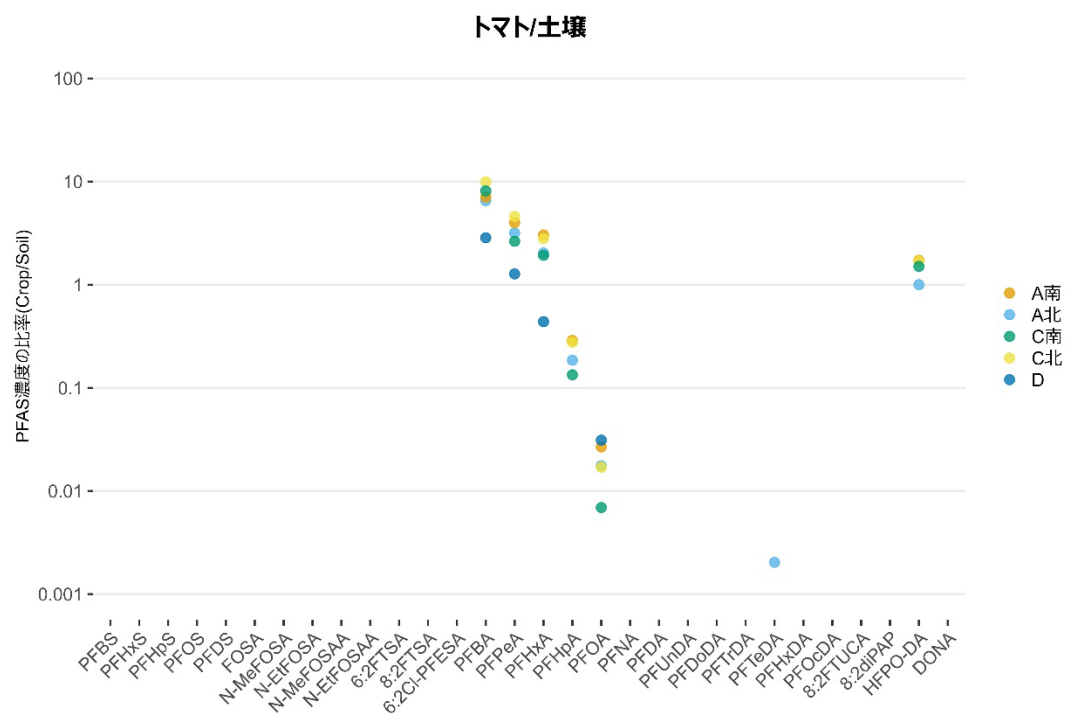


図21. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のトマト中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、[トマト中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度](縦軸)をプロットした。凡例の北、南は区画内の栽培箇所を示す。トマト中または土壌中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

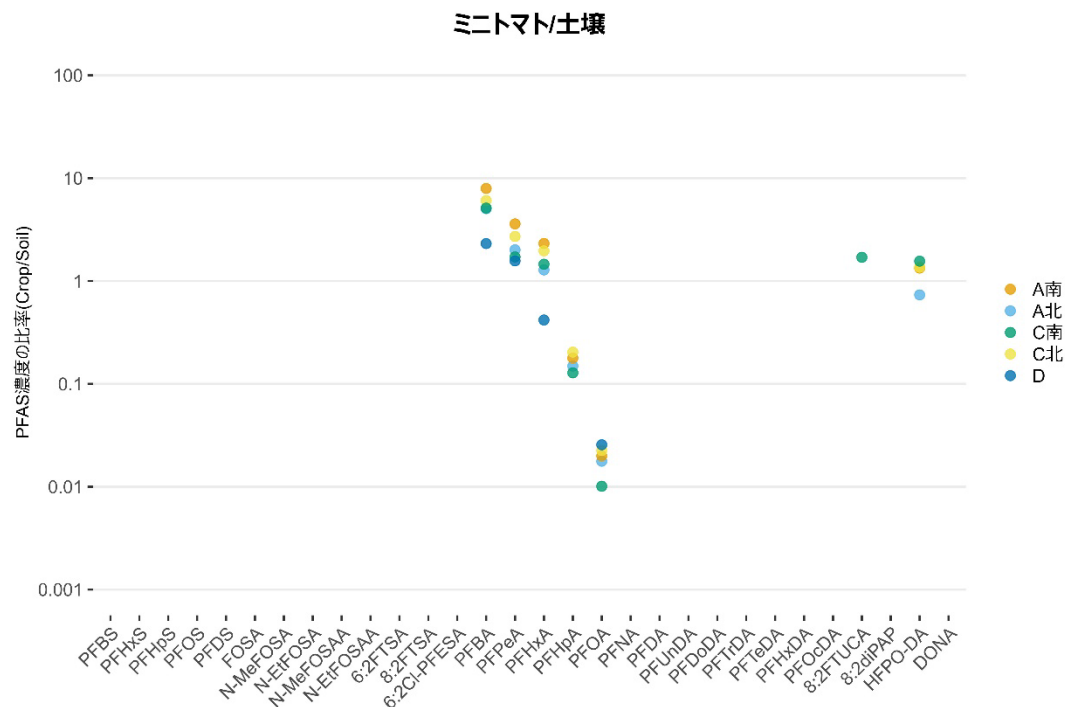


図22. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のミニトマト中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、[ミニトマト中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度](縦軸)をプロットした。北、南は区画内の栽培箇所を示す。ミニトマトまたは土壌に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

・葉菜類（ほうれんそう、キャベツ）中のPFAS動態解明

葉菜類（ほうれんそう、キャベツ）に関し、〔作物中のPFAS濃度/土壌中のPFAS濃度〕を算出した結果、葉菜類についてもPFASの水溶解性が移行に大きく影響すると考えられた。また、葉菜類に関しても、HFPO-DAの蓄積が一部の試料から見られた。同じ葉菜類ではあるが、形態的に葉に土壌の付着しやすいほうれんそう（図23）においては、土壌付着の機会が少ないキャベツ（図24）では蓄積が見られなかった長鎖PFCAsが検出されており、農地土壌の付着影響の検討が必要と考えられた。

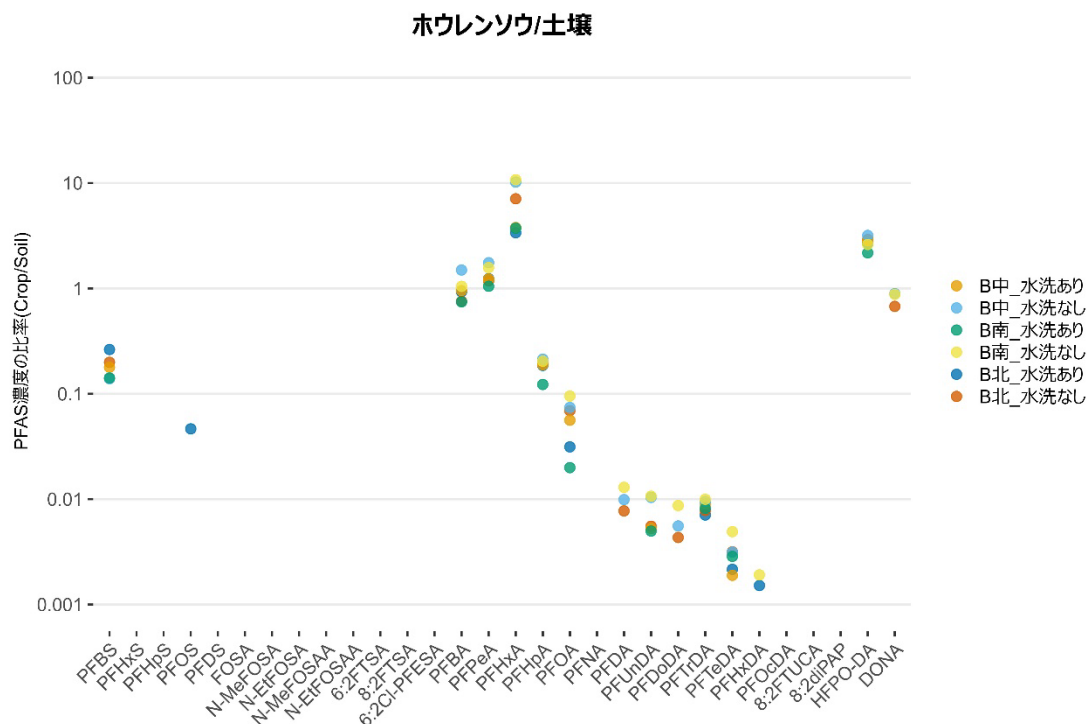


図23. 畑地C(区画B)のほうれんそう中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、〔ほうれんそう中のPFAS濃度〕/〔土壌中のPFAS濃度〕(縦軸)をプロットした。凡例の北、中、南は区画B内の栽培箇所を示す。ほうれんそう中または土壌中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

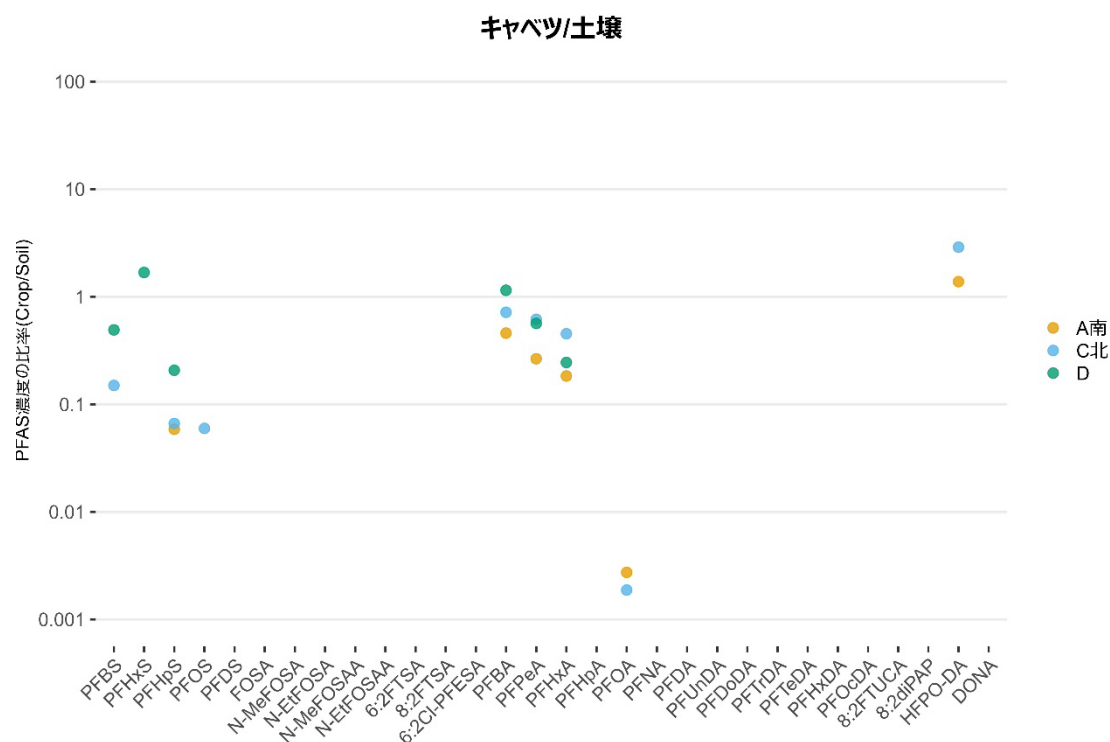


図24. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のキャベツ中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

30種のPFASについて、[キャベツ中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度](縦軸)をプロットした。凡例の北、南は畑地区画内の栽培箇所を示す。キャベツ中または土壌中に観測されなかったPFAS分子種については、プロットせず空白とした。

6) 現時点における令和6年度達成目標から見た問題点と令和7年度の達成目標

問題点は特になし。

令和7年度は各種農作物へのPFAS移行特性の解明のため、土壌中に高濃度PFASを含有する2地区の試験圃場において各種農作物を栽培し、農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査を実施する。

7) 最終目標の達成見込み

土壌及び農業用水からの農作物へのPFAS移行については、多様な農地土壌中のPFAS分子種に関して新たな知見が得られ、最終目標である動態の全容解明に向けた基盤作りができた。そのため、本課題は目標の達成に向けて順調に進んでいると言える。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題*番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	2 各種農作物へのPFAS移行特性の解明		
実行課題名	(2) 農作物へのPFAS吸収・移行のメカニズムの解明		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析 ユニット・殷 熙洙		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	神戸大・バイオシグナル総合研・シグナル分子応答研究部 門・乾 秀之		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニ ット・殷 熙洙		

II. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

ナス科のトマト及びじゃがいも、セリ科のにんじんの導管液に含まれるPFOS及びPFOA濃度を定量する。また、ウリ科作物が持つMLP (Major latex-like protein) とPFOS及びPFOAの結合確認を行い、MLPがPFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能しているか調べる。

2) 研究進捗状況

ズッキーニ2品種、かぼちゃ、きゅうり、トマト、じゃがいも、にんじんの導管液におけるPFOS及びPFOA蓄積特性が明らかとなった。また、MLPとPFOS及びPFOAの結合が明らかとなった。

3) 令和6年度の達成目標

ウリ科作物が持つ汚染物質輸送因子MLPとPFOS及びPFOAの結合を詳細に調べ、MLPがPFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能するかを突き止め、農作物におけるPFOS及びPFOAの吸収・移行を解明するエビデンスを見出す。また、ナス科のトマト及びじゃがいも、セリ科のにんじんについてもPFOS及びPFOAの吸収・移行に関して調査し、作物種によるPFOS及びPFOAの吸収・移行の差異を明らかにすることを目標とする。

4) 令和6年度研究方法

3種のウリ科作物（ズッキーニ2品種、かぼちゃ、きゅうり）、2科の非ウリ科作物（ナス科のトマト及びじゃがいも、セリ科のにんじん）を人工気象器において4週間栽培し、導管液採取前日にPFOSもしくはPFOAを含む水を与えた。採取した導管液に

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

含まれるPFOS、PFOA濃度を定量した。さらに、組換えMLP及びウリ科作物導管液中タンパク質と、PFOS、PFOAの結合強度を評価した。

5) 令和6年度研究結果

ウリ科作物とトマトの導管液では、PFOSよりもPFOA濃度が高かった。PFOS、PFOAの水溶解性の違いが導管液濃度に影響していると考えられる(図25)。じゃがいもではPFOS濃度の方が高い一方、にんじんではPFOS、PFOAの濃度はいずれも低く、同程度であった。これら作物には、ウリ科作物やトマトとは異なるPFAS移行特性があると考えられる。統計的には有意でないもののPFOS濃度はじゃがいもで最も高く、PFOA濃度は汚染物質に対して高蓄積性を示すズッキーニRA品種やかぼちゃで高かった。

ズッキーニMLPの組換えタンパク質(MLP-GR3)について、PFOS結合ビーズを用いた結合評価実験(図26A)を行った結果、PFOS及びPFOAとの結合が確認された(図26B)。これはドッキングシミュレーションの結果と一致していた。また、ズッキーニRA品種とかぼちゃ導管液にはPFOSと結合するタンパク質が存在していた(図26C)。MLPが17kDaの分子量を持つことから考えると、これらはMLPと推測された。ズッキーニRA品種とかぼちゃにおけるPFOS及びPFOAの導管液濃度が、PG品種やきゅうりより高かったことを考えると、MLPがPFASの輸送に関与している可能性が考えられた。

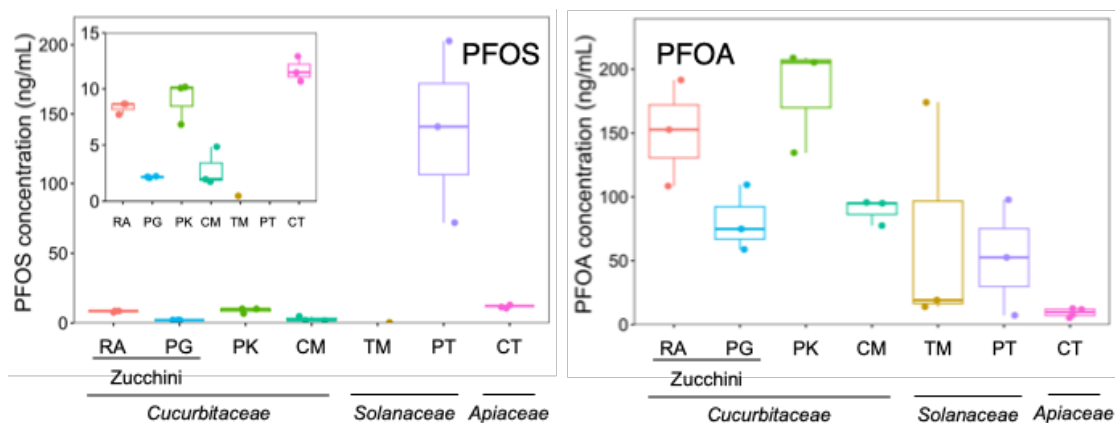


図25 PFOS及びPFOAを与えた各種作物の導管液中PFAS濃度

RA, ズッキーニRA品種; PG, ズッキーニPG品種; PK, かぼちゃ; CM, きゅうり;
TM, トマト; PT, じゃがいも; CT, にんじん

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

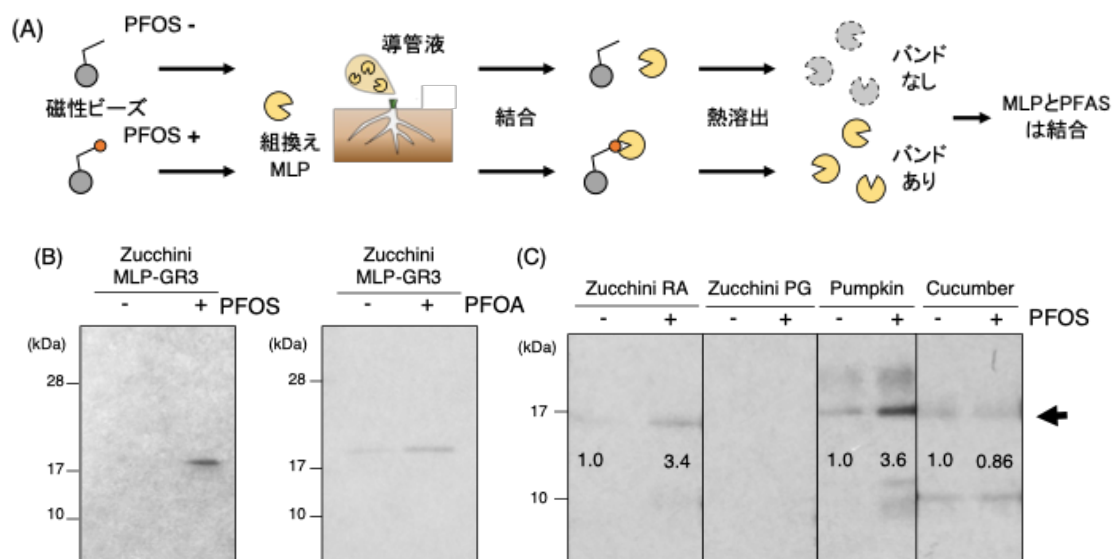


図2-6 PFOS及びPFOAとMLPの結合評価

(A) 結合評価の原理、(B) 組換え MLP を用いた結果、(C) ウリ科作物導管液を用いた結果

泳動後のタンパク質は銀染色法により検出し、泳動写真中の数字はPFOS非結合ビーズのバンド強度を1とした時の相対強度を示す。

6) 現時点における令和6年度達成目標から見た問題点と令和7年度の達成目標

問題点は特になし。令和7年度の達成目標はキャベツ／ブロッコリー（アブラナ科）、ほうれんそう（ヒユ科）を用いて、PFOS及びPFOAの吸収・移行を調査し、農作物種によるPFOS及びPFOAの吸収・移行の差異を明らかにする。ウリ科作物から発見された汚染物質輸送因子MLP (Major latex-like protein) が、PFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能するか明らかにする。

7) 最終目標の達成見込み

ウリ科作物に対するPFOS及びPFOAの蓄積特性を明らかにし、MLPがPFOS及びPFOAと結合することが予測された。したがって、MLPがPFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能していることを示唆できたことから、最終目標の達成に着実に近づいていると言える。

※本報告書の内容は、令和6年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

別紙 1

化合物名	略称	IUPAC名	組成式	CAS-RN
Perfluoro- <i>n</i> -butanesulfonic acid	PFBS	1,1,2,2,3,3,4,4,4-Nonafluorobutane-1-sulfonic acid	C ₄ HF ₉ O ₃ S	375-73-5
Perfluoro- <i>n</i> -hexanesulfonic acid	PFHxS	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-Tridecafluorohexane-1-sulfonic acid	C ₆ HF ₁₃ O ₃ S	355-46-4
Perfluoro- <i>n</i> -heptanesulfonic acid	PFHpS	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7-Pentadecafluoroheptane-1-sulfonic acid	C ₇ HF ₁₅ O ₃ S	375-92-8
Perfluoro- <i>n</i> -octanesulfonic acid	PFOS	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Heptadecafluorooctane-1-sulfonic acid	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	1763-23-1
Perfluoro- <i>n</i> -decanesulfonic acid	PFDS	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-Henicosafuorodecane-1-sulfonic acid	C ₁₀ HF ₂₁ O ₃ S	335-77-3
Perfluorooctanesulfonamide	FOSA	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Heptadecafluoro-1-octanesulfonamide	C ₈ H ₂ F ₁₇ NO ₂ S	754-91-6
<i>N</i> -methyl perfluoro-octanesulfonamide	<i>N</i> -MeFOSA	1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Heptadecafluoro- <i>N</i> -methyl-1-octanesulfonamide	C ₉ H ₄ F ₁₇ NO ₂ S	31506-32-8
<i>N</i> -ethyl perfluoro-octanesulfonamide	<i>N</i> -EtFOSA	<i>N</i> -Ethyl-1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-heptadecafluorooctane-1-sulfonamide	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ NO ₂ S	4151-50-2
<i>N</i> -methyl perfluoro-octanesulfonamidoacetic acid	<i>N</i> -MeFOSAA	2-[1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Heptadecafluorooctylsulfonyl(methyl)amino]acetic acid	C ₁₁ H ₆ F ₁₇ NO ₄ S	2355-31-9
<i>N</i> -ethyl perfluoro-octanesulfonamidoacetic acid	<i>N</i> -EtFOSAA	2-[Ethyl(1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-heptadecafluorooctylsulfonyl)amino]acetic acid	C ₁₂ H ₈ F ₁₇ NO ₄ S	2991-50-6
6:2 Fluorotelomer sulfonic acid	6:2 FTSA	3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Tridecafluorooctane-1-sulfonic acid	C ₈ H ₅ F ₁₃ O ₃ S	27619-97-2
8:2 Fluorotelomer sulfonic acid	8:2 FTSA	3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-Heptadecafluorodecane-1-sulfonic acid	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ O ₃ S	39108-34-4
6:2 Chlorinated perfluorinated ether sulfonate	6:2 Cl-PFESA (9Cl-PF3ONS)	2-(6-Chloro-1,1,2,2,3,3,4,4,5,5,6,6-dodecafluorohexoxy)-1,1,2,2-tetrafluoroethanesulfonic acid	C ₈ HClF ₁₆ O ₄ S	756426-58-1
Perfluoro- <i>n</i> -butanoic acid	PFBA	2,2,3,3,4,4,4-Heptafluorobutanoic acid	C ₄ HF ₇ O ₂	375-22-4
Perfluoro- <i>n</i> -pentanoic acid	PFPeA	2,2,3,3,4,4,5,5-Nonafluoropentanoic acid	C ₅ HF ₉ O ₂	2706-90-3
Perfluoro- <i>n</i> -hexanoic acid	PFHxA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,6-Undecafluorohexanoic acid	C ₆ HF ₁₁ O ₂	307-24-4
Perfluoro- <i>n</i> -heptanoic acid	PFHpA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,7-Tridecafluoroheptanoic acid	C ₇ HF ₁₃ O ₂	375-85-9
Perfluoro- <i>n</i> -octanoic acid	PFOA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,8-Pentadecafluorooctanoic acid	C ₈ HF ₁₅ O ₂	335-67-1
Perfluoro- <i>n</i> -nonanoic acid	PFNA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,9-Heptadecafluorononanoic acid	C ₉ HF ₁₇ O ₂	375-95-1
Perfluoro- <i>n</i> -decanoic acid	PFDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-Nonadecafluorodecanoic acid	C ₁₀ HF ₁₉ O ₂	335-76-2
Perfluoro- <i>n</i> -undecanoic acid	PFUnDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,11-Henicosafuoroundecanoic acid	C ₁₁ HF ₂₁ O ₂	2058-94-8
Perfluoro- <i>n</i> -dodecanoic acid	PFDoDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12-Tricosafuorododecanoic acid	C ₁₂ HF ₂₃ O ₂	307-55-1
Perfluoro- <i>n</i> -tridecanoic acid	PFTTrDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13-Pentacosafuorotridecanoic acid	C ₁₃ HF ₂₅ O ₂	72629-94-8
Perfluoro- <i>n</i> -tetradecanoic acid	PFTeDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13,14,14,14-Heptacosafuorotetradecanoic acid	C ₁₄ HF ₂₇ O ₂	376-06-7
Perfluoro- <i>n</i> -hexadecanoic acid	PFHxDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13,14,14,15,15,16,16,16-Hentriacontafuorohexadecanoic acid	C ₁₆ HF ₃₁ O ₂	67905-19-5
Perfluoro- <i>n</i> -octadecanoic acid	PFOcDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13,14,14,15,15,16,16,17,17,18,18,18-Pentatriacontafuorooctadecanoic acid	C ₁₈ HF ₃₅ O ₂	16517-11-6
8:2 Fluorotelomer unsaturated carboxylic acid	8:2 FTUCA	3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-Hexadecafluorodec-2-enoic acid	C ₁₀ H ₂ F ₁₆ O ₂	70887-84-2
8:2 Polyfluoroalkyl phosphate diester	8:2 diPAP	Bis(3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,10-heptadecafluorodecyl) hydrogen phosphate	C ₂₀ H ₉ F ₃₄ O ₄ P	678-41-1
Hexafluoropropylene oxide dimer acid	HFPO-DA	2,3,3,3-Tetrafluoro-2-(1,1,2,2,3,3,3-heptafluoropropoxy)propanoic acid	C ₆ HF ₁₁ O ₃	13252-13-6
4,8-Dioxa-3 <i>H</i> -perfluorononanoic acid	DONA	2,2,3-Trifluoro-3-[1,1,2,2,3,3-hexafluoro-3-(trifluoromethoxy)propoxy]propanoic acid	C ₇ H ₂ F ₁₂ O ₄	919005-14-4

安全な農畜水産物安定供給のための包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業

「農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明」

令和7年度 研究実績報告書

課題番号	23812803
課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明

研究実施期間	令和5年度～令和9年度（5年間）
代表機関	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構
研究総括者	高度分析研究センター長 山崎 俊正
共同研究機関	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所
	公益財団法人ひょうご環境創造協会
	国立大学法人神戸大学
	アジレント・テクノロジー株式会社
	株式会社島津製作所
	日本ウォーターズ株式会社
	株式会社島津テクノリサーチ
	一般財団法人日本食品分析センター
	国立大学法人東京農工大学
	独立行政法人農林水産消費安全技術センター

＜別紙様式2＞研究実績報告書

令和7年度 安全な農畜水産物安定供給のための
包括的レギュラトリーサイエンス研究推進委託事業
「農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明」
研究実績報告書

I. 研究の進捗状況等

本課題は、農産物由来のPFAS（パーフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物の総称）摂取のリスク管理に資する科学的知見を得るため、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農産物へ移行する場合、その特徴的な分子種や移行程度を解明するとともに、この動態解明に必要な試験・分析法を開発することを目的としている。

試験・分析法の開発については、今年度は、昨年度から今年度にかけて実施した国内24機関による共同試験結果を踏まえた（農業用）水に含まれる多成分PFASの分析マニュアルを作成した。また、根菜類（令和7年度）、果菜類（令和8年度）、葉菜類（令和9年度）及び米について、順次分析法を開発し、区分に応じたマニュアルを作成することとしていたが、昨年度前倒しで3区分の野菜を対象とした暫定分析法の開発に取り組んだ結果、脂溶性色素成分やでんぷん等、それぞれの野菜の特徴的な成分を考慮してマニュアルを整理する方が利用者にとって有用であることがわかった。そのため、今年度は代表的な野菜ごとの簡便な前処理法を作成し、コンソーシアム内で共有した。

農産物への移行に関しては、PFAS組成の異なる試験圃場を新たに確保し、それぞれの圃場で同じ作物を栽培して、土壌、水を介したPFASの移行解明に取り組み、栽培が終了した農産物について、順次PFASの分子種や濃度を解析している。昨年に続き、ウリ科作物が持つ汚染物質輸送因子MLP（Major latex-like protein）とPFOS及びPFOAの結合について*in silico*で調べた上で、各作物の導管液のPFOS及びPFOA濃度を調べることで、2科の非ウリ科作物（ナス科：トマト・ジャガイモ、セリ科：にんじん）のPFOS及びPFOAの吸収・移行に特徴があることを示し、計画通り研究が進捗した。

1. 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発

課題1－（1）では、農業用水中のPFAS分析法のマニュアル（英文・和文）を作成した。また、農産物として代表的な野菜をまとめた、農産物に含まれるPFAS分析法のマニュアルの作成を開始した。農産物分析にあたっては、夾雑物除去のための試行錯誤を省く前処理法についても検討を行った。

課題1－（2）では、色素成分を多く含むトマトとホウレンソウにおいても、本課題参画機関間でPFAS分析値のクロスチェックができる体制を構築した。

2. 各種農産物へのPFAS移行特性の解明

課題2－（1）では、土壌中にPFOAを多く含む試験圃場に加えて、土壌中にPFOSを多く含む試験圃場での試験研究を実施した。

PFOAを多く含む試験圃場について、カボチャ、ニンジン、サツマイモ、ナス、ズッキーニの栽培試験のデータが得られた。その結果、土壌中のPFOAが高濃度であってもこれら農作物中のPFOA濃度は低く、これら農作物の可食部にはほとんど吸収移行しないことが明らかになった。

PFOSを多く含む試験圃場について、ニンジン、ジャガイモ、ダイコン、キャベツ及びホウレンソウの栽培試験のデータが得られた。PFOAを多く含む試験圃場の場合と類似して、土壌中のPFOSが高濃度であってもこれら農作物にはほとんど吸収移行されず、こ

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

れら野菜の可食部中の含有量はごく微量であることが判明した。

小課題2－(2)では、昨年度のウリ科作物（ズッキーニ2品種、かぼちゃ、きゅうり）及び非ウリ科作物（ナス科のトマト及びジャガイモ、セリ科のニンジン）に続き、非ウリ科作物（キャベツ／ブロッコリー、ハウレンソウ）の導管液に含まれるPFOS、PFOA濃度を測定し、その蓄積特性を比較した。また、*in silico*ドッキングシミュレーションによりPFASとMLPの結合強度を算出することで、MLPのPFAS地上部輸送への関与を示唆するデータを蓄積した。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題* 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	1 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
実行課題名	(1) 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・亀山眞由美		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	産総研 環境創生研究部門・環境計測技術研究グループ・谷 保佐知 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、小野順子 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村 千里		

Ⅱ. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

農業環境（農地土壌と農業用水）及び農産物中に特徴的に観測されるPFAS分子種を特定し、それぞれの濃度を把握するため、試料採取方法、前処理、抽出、精製、定性・定量測定についての試験・分析法を開発する。

2) 研究進捗状況

浮遊物を多く含む農業用水等の環境水中PFASについて、室間試験結果を踏まえ、実践的かつ実施者の負担軽減に配慮した分析法マニュアル（英文・和文）を作成した。なお、本マニュアルは令和8年度前期に公開予定である。また、根菜類、果菜類、葉菜類について順次分析法を開発し、区分に応じたマニュアルを作成することとしていたが、昨年度前倒しで3区分の野菜の暫定分析法の開発に取り組んだ結果、区分にこだわらず、脂溶性色素成分やでんぷん等、それぞれの野菜に特徴的な成分を考慮したマニュアルの方が利用者に有用であることが判明したため、代表的な野菜について、分析法の性能を確認しつつ、農産物分析法マニュアルの作成を開始した。

3) 令和7年度の達成目標

浮遊物を多く含む農業用水等の環境水中のPFAS分析法について、室間共同試験の結果を踏まえたマニュアルの公開準備を完了する。昨年度までに開発した米、

根菜類、果菜類、葉菜類の分析法で分析試験を実施して結果をまとめ、小課題1－(2)に提供するとともに、農産物の一斉分析マニュアルの作成を開始する。

4) 令和7年度研究方法

1) (農業用) 水の分析方法

令和6年度までに開発した、農業用水等の環境水中PFAS分析法について、マニュアルの公開準備を進めるため、分析条件の確認及び室間共同試験のデータの再解析を行う。併せて、本事業とは別のプロジェクトで開発した固相抽出カラム(特許申請中のため詳細は記載しない)を用いた精製法との比較検討を実施し、主要4種PFAS(PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA)について、既存法と同等の分析結果が得られるかどうか確認する。

なお、令和6年度に開発した方法は、以下のとおり。

①50 mL容のPP遠沈管に水試料40 mLを入れ、内部標準物質を添加、試料容器をボルテックスミキサーで10秒以上攪拌し、遠心分離後、水相を100 mL容のPP遠沈管にデカンテーションで移す。

②PP遠沈管の底に残った浮遊物に0.5 %アンモニア/メタノールを5 mL添加、30分間振とう抽出(1回目)し、遠心分離後、上清を①の水試料上清容器にデカンテーションで移す。

③②の操作をさらに2回繰返し実施する。この際、振とう抽出は、ハンドシェイク(1分間)もしくは振とう装置(5分～10分間)で実施する。

④上記の工程で得た液に酢酸またはギ酸を加え、pHを4程度の酸性に調整後、WAX固相カラムで精製、分画する。

⑤窒素気流下、試料量を1 mLに濃縮し、その後、機器分析を行う。

⑥最終の試料液が着色する等、夾雑物が確認された場合、グラファイトカーボン等の固相カラムによる精製を追加で実施する。

新規固相抽出カラムを用いる精製法においては、④の工程にて、WAX固相カラムにかわり新規固相抽出カラムを適用した。この場合、⑥の工程は不要となる。

2) 農産物の分析方法

前述のように、異なる区分の農産物であっても同じ工程で夾雑物を除去できたりするなどの理由から、形態による区分ごとの分析マニュアルよりも、主な農産物をカバーする分析マニュアルを作成した方が利用者に有用であるとの判断から、農産物の一斉分析マニュアルを作成することとした。そのため、まず令和6年度までに開発した分析法で各農産物について単一ラボでの分析を実施し、正確な分析が可能かどうかを確認し、マニュアル作成に必要なデータの整理を行う。

併せて、本事業とは別のプロジェクトで開発した固相抽出カラム(特許申請中のため詳細は記載しない)を用いた精製法との比較検討を実施し、主要4種PFAS(PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA)について、既存法と同等の分析結果が得られるかどうか確認する。

なお、令和6年度に開発した方法は、以下のとおり。ただし、昨年度開発した方法より、抽出液総量を30 mLから16 mLに減らし、濃縮時間の短縮を図った。

①粉碎済みの試料5 gに内部標準物質を添加、試料容器をボルテックスミキサーで約10秒以上攪拌し、アセトニトリルまたは0.5 %アンモニア/メタノールで3回(10 mL－10 mL－10 mL(30 mLの場合)または8 mL－4 mL－4 mL(16 mLの場合))振とう抽出した後、遠心分離する。抽出液の上清を新しい50 mL容のPP遠沈管にデカンテーションで移す。

②抽出液の上澄み液の窒素濃縮が必要な場合は濃縮し、その後、純水を添加、

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

酢酸またはギ酸でpH約4の酸性に調整後、WAX固相カラムで精製、分画、1 mLに濃縮し、その後、機器分析を行う。

③最終の試料液に色等の夾雑物が確認された場合、グラファイトカーボン等の固相カラムの精製を追加で実施する。

上記の新規固相抽出カラムを用いる精製法においては、②の工程にて、WAX固相カラムにかわり新規固相抽出カラムを適用した。この場合、③の工程は不要となる。

5) 令和7年度研究結果

1) (農業用) 水の分析方法

令和8年度の前期に公開予定の(農業用)水のPFAS一斉分析マニュアル(和文・英文)(図1-1)は、公開済みの農研機構の土壤中PFAS一斉分析暫定マニュアルと同様、イラストを豊富に提供することで初心者でも理解しやすいように構成されている。本分析法は少量の水試料で実施可能なため、分析にかかる時間、労力、コストの削減によって分析実施者の負担を大幅に軽減できる手法である。また、従来困難であった水試料中の浮遊物(Suspended Solids, SS)による内部標準物質の添加回収率の低下の問題を克服できたため、試料採取における自由度が向上した。つまり、雨季の試料採取で問題となる泥(代掻き後の水試料等)や夏季に発生するアオコなどが試料に混入していても、多成分PFASの定性、定量分析が可能になった。したがって、この方法は農業用水のみならず、環境水は勿論、工業排水など幅広い水試料への適用性も高いと期待される。

マニュアル公開に向けて、浮遊物(SS)の量が2 g/Lを超える濁度や粘度が高い水試料を用いて24機関で実施した室間共同試験結果を再解析し、農研機構の単一試験室の結果(図1-2)と同様、図1-3のように参画機関からも極めて良好な結果が得られていることを確認した。

また、データは示していないが、新規固相抽出カラムを用いる精製法においても、主要4種PFAS(PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA)について、既存法と同等の分析結果が得られることを確認した。

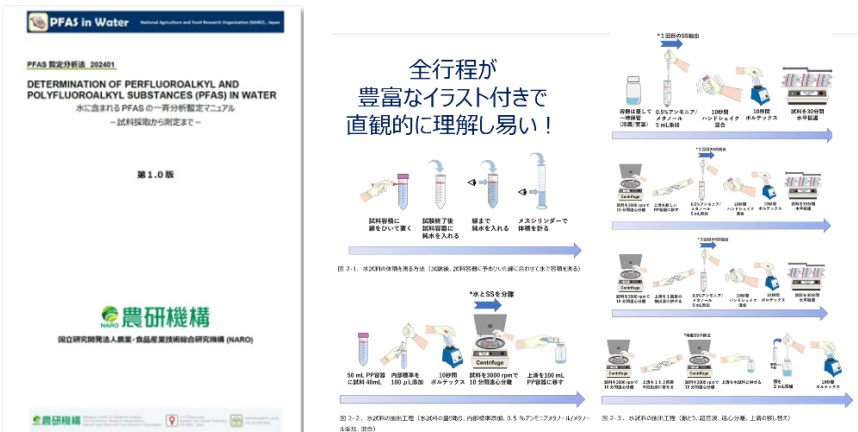


図1-1 (農業用) 水分析マニュアルに掲載の多成分PFAS一斉分析工程の例

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

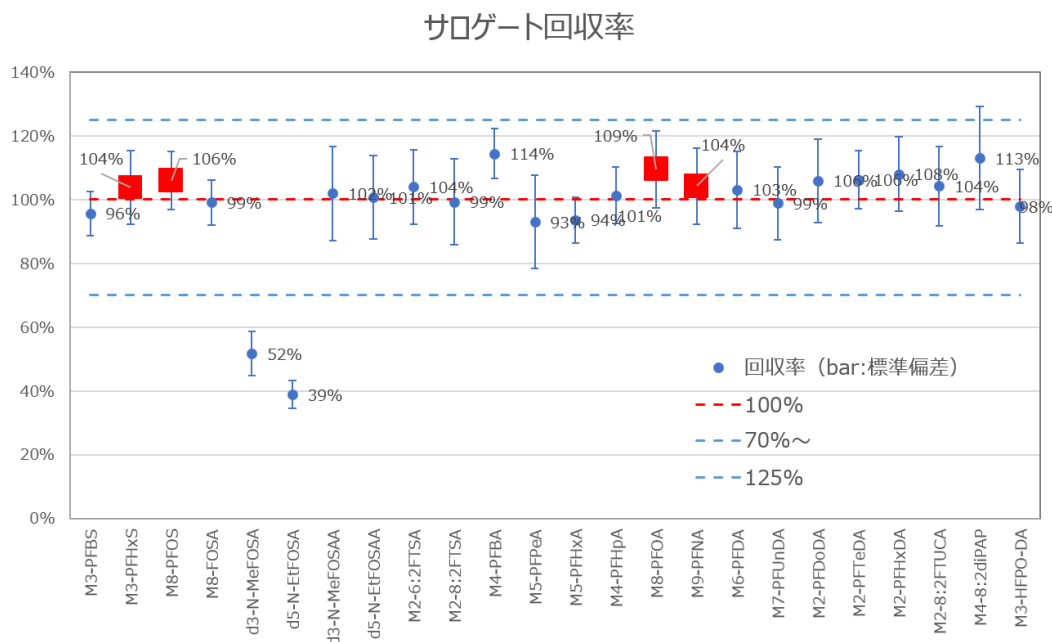


図1-2 (農業用) 水分析マニュアルに基づく単一試験室での妥当性確認結果
(10点の試料について、前処理から機器分析までを併行して実施。サロゲートは24種の安定同位体標識PFAS化合物。主要4種PFASの内部標準物質を赤色で示した。)

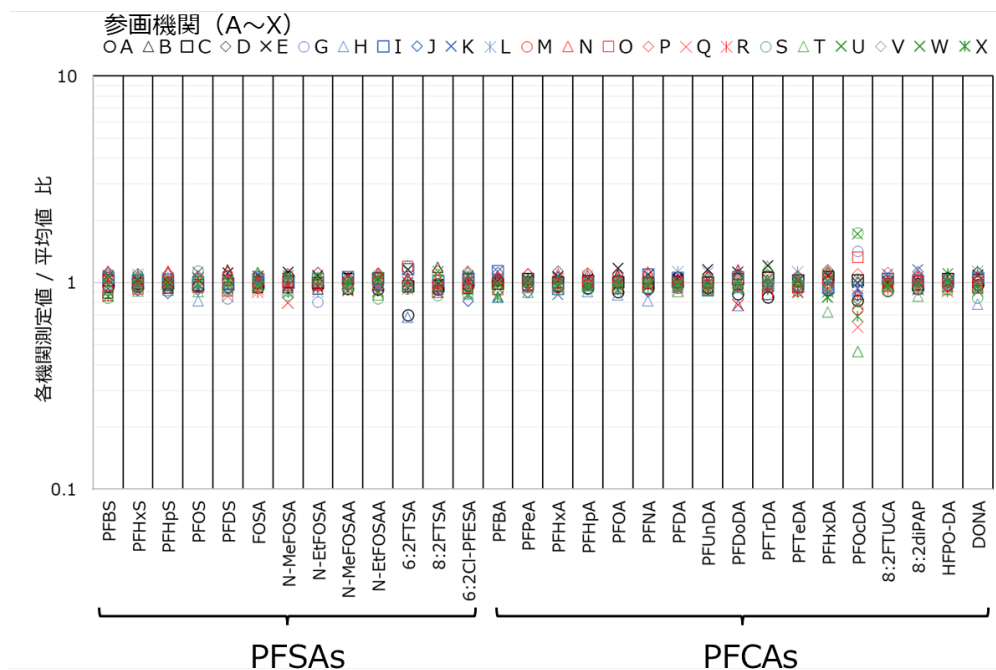


図1-3 (農業用) 水分析マニュアルに基づく複数機関での妥当性確認結果
Fは欠番

2) 農産物の分析方法

農産物の種類は多様であり、またそれぞれに含まれる夾雑物も多様であるため、微量のPFASの分析は困難とされている。食品中のPFAS分析法として、US FDAからQuEChERS (ケッチャーズ) 法の改良型メソッド (Method C-010.03) が提案されて

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

いるが、本来、QuEChERS法はスクリーニング法として用いられる。試料の抽出液の一部を前処理に供することから、試料の絶対量が少なく、分析対象物を高濃度に含む試料の選別には有効であるが、農産物中のPFASのように微量である場合には多くのPFASが不検出になる恐れがある。それに比較して、本課題で開発した農産物の分析方法は5 gの試料からの抽出物を全量分析に供するために、低濃度のPFASを含め正確な分析結果を提供することができると期待される。

当初、根菜類、果菜類、葉菜類と野菜の形態で区分して、それぞれの分析マニュアルを作成する予定であったが、同じ区分に属している農産物でも分析夾雑物が異なるため、抽出工程を変更する必要が生じたり、異なる区分の農産物であっても同じ工程で夾雑物を除去できたりするなどの理由から、形態による区分ごとの分析マニュアルよりも、指定野菜等の主な農産物をカバーする分析マニュアルを作成した方が利用者に有用であると判断した（図1－4）。

以下では、マニュアル作成のための単一ラボでの試験データとして、各農産物での分析結果を順に記載する。

なお、PFAS分析で汎用されるWAXカラムは、1回の精製で夾雑物を除去できない場合が多く、試料ごとに夾雑物の種類や量に応じて充填剤（グラファイトカーボン）の量・種類の検討が必要である。令和7年度は、できるだけシンプルな前処理法とするため、固相カラムの選択や、追加精製の必要性の検討等の試行錯誤の必要がない農産物の前処理法を開発し、その方法が農産物のPFAS定量に適用できることも併せて確認した。

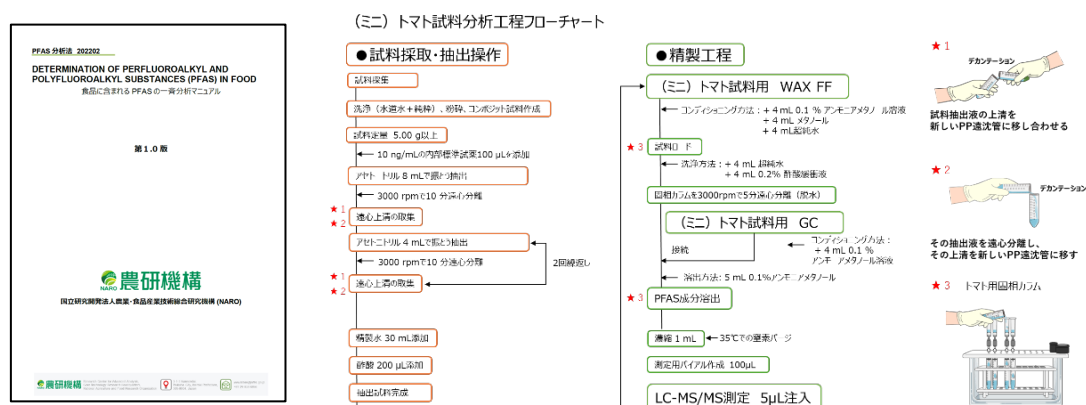


図1－4 作成中の食品に含まれるPFASの一斉分析マニュアルと分析工程の例

・米（玄米、白米）のPFAS試験・分析法の試験結果

米（玄米、白米）は澱粉の主成分であるアミロペクチンとアミロースのような高分子化合物を多く含んでいるために、安定かつ効率的に多成分PFASの抽出、精製が難しい。そのため、様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで2回抽出後（抽出液総量が30 mLの場合。抽出液総量が16 mLの場合は、1回目8 mL、2回目4 mL。以下同様に、括弧内に抽出液総量が16 mLの場合の量を記載）、10 mL（4 mL）の0.5 %アンモニア/メタノールで1回抽出を行い、合わせた抽出液を5 mLまで窒素濃縮して純水を45 mL添加後、酢酸でpHを調整する試料準備工程ののち、精製を行うことで安定かつ正確な分析ができた。表1－1に示すように、主要4種PFAS化合物以外についても、8:2diPAP、*N*-MeFOSAを除き内部標準物質の回収率はおおむね良好であった。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

また、データは示さないが、新たに開発した固相カラムを前処理に用いた場合においても、主要4種PFAS（PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA）について本結果と同等の良好な結果が得られた。

表1－1. 米（玄米、白米）のPFAS試験・分析法におけるPFAS化合物内部標準物質の回収試験結果

PFSAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数	PFCAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数
M3-PFBS	111%	2%	2%	M4-PFBA	107%	3%	3%
M3-PFHxS	111%	4%	3%	M5-PFPeA	97%	2%	2%
M8-PFOS	112%	2%	2%	M5-PFHxA	104%	4%	4%
M8-FOSA	103%	3%	3%	M4-PFHpA	114%	4%	3%
d3-N-MeFOSA	48%	2%	3%	M8-PFOA	116%	4%	3%
d5-N-EtFOSA	101%	3%	3%	M9-PFNA	121%	0%	0%
d3-N-MeFOSAA	130%	5%	4%	M6-PFDA	124%	3%	2%
d5-N-EtFOSAA	126%	7%	6%	M7-PFUnDA	122%	1%	1%
M2-6:2FTSA	92%	2%	3%	M2-PFDoDA	102%	5%	5%
M2-8:2FTSA	111%	1%	1%	M2-PFTeDA	143%	6%	4%
				M2-PFHxDA	121%	7%	6%
				M2-8:2FTUCA	107%	5%	4%
				M4-8:2diPAP	367%	35%	10%
				M3-HFPO-DA	92%	6%	6%

・ジャガイモ、サツマイモ、ダイコンのPFAS試験・分析法の試験結果

多種・多様な根菜類の中からジャガイモ、サツマイモ、ダイコンについて様々な抽出溶媒、水による希釈量、pHなどを検討した。その結果、ジャガイモとサツマイモは米と同様に、各試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで2回抽出後（抽出液総量が16 mLの場合は1回目8 mL、2回目4 mL）、10 mL（4 mL）の0.5%アンモニア/メタノールで1回抽出を行い、合わせた抽出液を5 mLまで窒素濃縮して純水を45 mL添加後、酢酸でpHを調整する試料準備工程ののち、精製を行うことで安定かつ正確な分析ができた。一方、ダイコンは、試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで3回抽出後（抽出液総量が16 mLの場合は、1回目が8 mL、2、3回目が4 mL）、5 mLまでに抽出液を窒素濃縮した試料に純水15 mL添加、酢酸でpHを調整した試料準備工程で安定かつ正確な分析ができた（表1－2）。

そのため、実行課題2－（1）「農地土壌、水等から農産物へのPFAS移行動態調査」でのジャガイモ、サツマイモ、ダイコンのPFASの分析において、本分析法を適用した。

また、データは示さないが、新規固相抽出カラムを前処理に用いた場合においても、主要4種PFAS（PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA）について本結果と同等の良好な結果が得られた。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表1-2. ジャガイモのPFAS試験・分析法におけるPFAS化合物内部標準物質の回収試験結果

PFSAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数		PFCAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数
M3-PFBS	113%	7%	7%		M4-PFBA	52%	4%	8%
M3-PFHxS	96%	3%	3%		M5-PFPeA	92%	6%	6%
M8-PFOS	91%	4%	5%		M5-PFHxA	87%	3%	3%
M8-FOSA	89%	4%	4%		M4-PFHpA	107%	5%	4%
d3-N-MeFOSA	52%	2%	3%		M8-PFOA	111%	2%	2%
d5-N-EtFOSA	59%	9%	16%		M9-PFNA	103%	5%	5%
d3-N-MeFOSAA	91%	3%	3%		M6-PFDA	90%	2%	2%
d5-N-EtFOSAA	84%	1%	1%		M7-PFUnDA	84%	7%	8%
M2-6:2FTSA	106%	8%	8%		M2-PFDoDA	86%	4%	5%
M2-8:2FTSA	96%	5%	6%		M2-PFTeDA	92%	7%	8%
					M2-PFHxDA	82%	15%	18%
					M2-8:2FTUCA	86%	3%	3%
					M4-8:2diPAP	93%	16%	17%
					M3-HFPO-DA	88%	4%	4%

・きゅうり、ズッキーニ、（ミニ）トマトのPFAS試験・分析法の試験結果

多種・多様な果菜類の中からきゅうり、ズッキーニ、（ミニ）トマトについて様々な抽出溶媒、水による希釈量、pHなどを検討した。その結果、きゅうりとズッキーニは各試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで2回抽出後（抽出液総量が16 mLの場合は1回目8 mL、2回目4 mL）、10 mL（4 mL）の0.5%アンモニア/メタノールで1回抽出を行い、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に純水を15 mL添加し、酢酸でpHを調整した。この抽出工程を経てWAXカラムで精製しても、なお試料中に分析夾雑物が残存したことから、その除去のため、ENVI-Carbを用いた精製工程を組入れた結果、安定かつ正確な分析ができた（表1-3）。

一方、ミニトマト及びトマトは、試料5 gに対して、10 mLのアセトニトリルで3回抽出後（抽出液総量が16 mLの場合は、1回目が8 mL、2、3回目が4 mL）、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に純水を15 mL添加し、酢酸でpHを調整した。この試料準備工程を経てWAXカラムで精製しても、なお試料中に分析夾雑物が残存したことから、ENVI-Carbを用いた精製工程も実施した。これにより安定かつ正確な分析ができた（表1-4）。主要4種PFAS化合物以外についても、FOSA類を除き内部標準物質の回収率は良好であった。

そのため、実行課題2-（1）「農地土壌、水等から農産物へのPFAS移行動態調査」での果菜類（きゅうり、ズッキーニ、（ミニ）トマト）のPFAS分析において、本分析法を適用した。

また、データは示さないが、新規固相抽出カラムを前処理に用いた場合においても、主要4種PFAS（PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA）について本結果と同等の良好な結果が得られた。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表 1－3. きゅうりのPFAS試験・分析法におけるPFAS化合物内部標準物質の回収試験結果

PFSAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数	PFCAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数
M3-PFBS	121%	5%	4%	M4-PFBA	75%	1%	2%
M3-PFHxS	119%	2%	2%	M5-PFPeA	115%	3%	3%
M8-PFOS	119%	6%	5%	M5-PFHxA	102%	3%	3%
M8-FOSA	106%	2%	2%	M4-PFHpA	116%	4%	3%
d3-N-MeFOSA	51%	6%	12%	M8-PFOA	105%	3%	3%
d5-N-EtFOSA	52%	5%	10%	M9-PFNA	117%	5%	5%
d3-N-MeFOSAA	118%	6%	5%	M6-PFDA	118%	8%	7%
d5-N-EtFOSAA	110%	5%	5%	M7-PFUnDA	107%	3%	2%
M2-6:2FTSA	132%	4%	3%	M2-PFDoDA	105%	3%	3%
M2-8:2FTSA	132%	3%	2%	M2-PFTeDA	106%	5%	4%
				M2-PFHxDA	101%	2%	2%
				M2-8:2FTUCA	99%	2%	2%
				M4-8:2diPAP	104%	14%	13%
				M3-HFPO-DA	122%	2%	2%

表 1－4. トマトのPFAS試験・分析法におけるPFAS化合物内部標準物質の回収試験結果

PFSAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数	PFCAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数
M3-PFBS	92%	3%	3%	M4-PFBA	88%	4%	5%
M3-PFHxS	89%	5%	5%	M5-PFPeA	84%	5%	6%
M8-PFOS	88%	6%	7%	M5-PFHxA	80%	6%	7%
M8-FOSA	61%	4%	6%	M4-PFHpA	92%	5%	5%
d3-N-MeFOSA	60%	2%	3%	M8-PFOA	86%	6%	7%
d5-N-EtFOSA	63%	3%	4%	M9-PFNA	92%	5%	6%
d3-N-MeFOSAA	94%	17%	18%	M6-PFDA	92%	7%	8%
d5-N-EtFOSAA	83%	5%	6%	M7-PFUnDA	85%	4%	5%
M2-6:2FTSA	77%	6%	8%	M2-PFDoDA	83%	5%	6%
M2-8:2FTSA	80%	4%	5%	M2-PFTeDA	93%	9%	10%
				M2-PFHxDA	82%	4%	5%
				M2-8:2FTUCA	90%	10%	11%
				M4-8:2diPAP	102%	23%	23%
				M3-HFPO-DA	88%	7%	7%

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

・ホウレンソウ、キャベツのPFAS試験・分析法の試験結果

多種・多様な葉菜類の中からホウレンソウとキャベツについて様々な抽出溶媒、純水容量、pHなどを検討した。その結果、ホウレンソウとキャベツは各試料5 g に対して、10 mL（抽出液総量が16 mLの場合は、1回目が8 mL、2、3回目が4 mL）のアセトニトリルで3回抽出後、抽出液を5 mLまで窒素濃縮した試料に純水を15 mL添加し、酢酸でpHを調整した抽出工程を行うが、ホウレンソウの分画後は精製しても試料中に残る分析夾雑物除去のため、数回のENVI-Carbを用いた精製工程を繰り返して実施することで安定かつ正確な分析ができた（表1－5）。主要4種PFAS化合物以外についても、8:2diPAPと*N*-MeFOSAAを除き内部標準物質の回収率は良好であった。

そのため、実行課題2－（1）「農地土壌、水等から農産物へのPFAS移行動態調査」での葉菜類（ホウレンソウ、キャベツ）のPFAS分析において、本分析法を適用した。

また、データは示さないが、新規固相抽出カラムを前処理に用いた場合においても、主要4種PFAS（PFHxS、PFOS、PFOA、PFNA）について本結果と同等の良好な結果が得られた。

表1－5. 葉菜類（ホウレンソウ）のPFAS試験・分析法における主要4種PFAS化合物（グループ1化合物）内部標準物質の回収試験結果

PFSAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数	PFCAs	平均 (n=3)	標準偏差	変動係数
M3-PFBS	92%	3%	4%	M4-PFBA	44%	4%	9%
M3-PFHxS	96%	3%	3%	M5-PFPeA	86%	3%	4%
M8-PFOS	109%	2%	2%	M5-PFHxA	71%	3%	4%
M8-FOSA	72%	2%	3%	M4-PFHpA	106%	1%	1%
d3-N-MeFOSA	54%	2%	3%	M8-PFOA	121%	4%	4%
d5-N-EtFOSA	85%	4%	5%	M9-PFNA	119%	1%	1%
d3-N-MeFOSAA	165%	4%	2%	M6-PFDA	116%	7%	6%
d5-N-EtFOSAA	113%	4%	4%	M7-PFUnDA	114%	6%	6%
M2-6:2FTSA	129%	14%	11%	M2-PFDoDA	101%	2%	2%
M2-8:2FTSA	107%	3%	2%	M2-PFTeDA	118%	6%	5%
				M2-PFHxDA	108%	3%	3%
				M2-8:2FTUCA	109%	9%	8%
				M4-8:2diPAP	265%	46%	17%
				M3-HFPO-DA	59%	15%	25%

6) 現時点における令和7年度達成目標から見た問題点と令和8年度の達成目標

令和7年度は、米ならびに野菜（ジャガイモ、サツマイモ、ダイコン、きゅうり、ズッキーニ、（ミニ）トマト、ホウレンソウ、キャベツ）に含まれるPFASの分析法について、主要4種以外のPFAS類についても良好な結果が得られることを確認した。残存する夾雑成分に着目して分析法の整理が可能であると考えられたため、マニュアルは根菜・果菜・葉菜等の形態ではなく、主な野菜について作成する。

また、1分析当たりひとつの新規固相抽出カラムで精製できる方法を用いて、水及び農産物に適用できることを確認した。

令和8年度は「1－（2）農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価」

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

において、農産物中PFAS分析法の外部検証を行うための暫定マニュアルの作成を完了する。

7) 最終目標の達成見込み

今後、土壌、水に続き、農産物に含まれる多成分PFAS一斉分析法を公開できる見込みが立ちつつある。これにより、農業環境及び各種農産物に含まれるPFASの実態調査に役立つことが見込まれるとともに、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を経由して農産物へ移行する際の移行の程度を解明し、農産物由来のPFAS摂取に係るリスク管理に資する科学的知見を得るという目標の達成に向けて大きく前進していると言える。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	1 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の開発		
実行課題名	(2) 農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・亀山眞由美		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者 名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者 名等	産総研 環境創生研究部門・環境計測技術研究グループ・谷保佐知 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、小野順子、伴野有彩 兵庫県環境研 水環境科・梅 拓也、松村千里 アジレント・テクノロジー社・ラボラトリーソリューション本部・城代 航、滝埜昌彦（～R7.10） 島津製作所社・分析計測事業部・小林まなみ、岩佐奈実、前島希 日本ウォーターズ社・学術本部・岩田敏明、小寺和樹、福沢栄太 島津テクノリサーチ社・環境事業部・高菅卓三、柴山 基、醍醐ふみ		

Ⅱ. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

農業環境及び農産物中のPFASの分析法を、高精度で信頼性の高いものとするため、分析機器メーカーを含む複数の機関で評価・検証する。

2) 研究進捗状況

小課題1－(1)で作成した水に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアルの公開、普及に向けて、令和6年度実施の「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験」の追加解析を1－(1)と共同で実施した。また、令和7年度は農産物における多成分一斉分析法のワークショップにより、小課題1－(1)で開

発した農産物のPFASの一斉分析法をコンソ内機関で評価、実施できる体制を構築した。

3) 令和7年度の達成目標

小課題1－(1)で開発した水に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアルを公開する。また、小課題1－(1)で開発された農産物における多成分一斉分析法のワークショップを実施し、室間共同試験の準備を進める。

4) 令和7年度研究方法

令和6年度までに、24機関で「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験」を実施し、これにより、30種PFASのうち25種は変動係数5%以内となり、PFAS定量に適用可能な分析法であることを示した。室間共同試験の結果を踏まえ、「水に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル（PFAS in Water: NAR0202401）」としてマニュアル化し、公表に向けて準備を進めた（小課題1－(1)と共通）。

農産物における多成分PFAS一斉分析法について、果菜類及び葉菜類に関しては本課題参画機関である環農水研、日本食品分析センター社、島津テクノロジー、FAMICに加えて、民間14社が参加したワークショップを実施し、農産物担当機関と民間分析機関への分析手法の技術移転を含め、分析法の普及のための予備的検討を行った。

5) 令和7年度研究結果

水に含まれるPFASの一斉分析暫定マニュアル作成の進捗状況については小課題1－(1)の報告と共通のため割愛する。

小課題1－(1)で開発された農産物向けの分析法について、民間14社を対象に農産物のPFAS一斉分析ワークショップを実施した。さらに、室間共同試験の準備についても着実に進め、トマトについて室間共同試験を実施した。結果のとりまとめは令和8年度に実施する予定である。

6) 現時点における令和7年度達成目標から見た問題点と令和8年度の達成目標

（農業用）水の分析法については、対面でのワークショップを実施しなくても、マニュアルと試験動画の共有のみで、外部機関でも直ちに試験実施が可能であった。一方、農産物のような食品分析に関しては、精製段階での着色の程度に基づく追加精製の判断の必要があるため、令和7年度はクロスチェックを実施するコンソ内分析機関で、対面でのワークショップにより情報共有を行った。

開発技術の普及に向けては、マニュアルに加え、動画もあるとより分かりやすいとの意見を踏まえ、ワークショップ及びその後のフォローアップで洗い出された分析の留意点を反映した説明動画の作成を開始し、令和8年度内の完成を目指す。また、米と根菜類のマニュアルの作成に加えて、果菜類及び葉菜類に適した分析法の開発に伴う室間共同試験の試料作製等を行う。

7) 最終目標の達成見込み

農業環境試料のPFASに最適な試験・分析法の評価のため、「土壤中多成分PFAS一斉分析法」に続き、国内最大規模の室間共同試験を実施し妥当性を確認した農業用水に適した分析法を確立し、マニュアル公開の準備ができた。このため、環境中に放出されたPFASが、農地土壌や農業用水を經由して農産物へ移行する際の移行の程度を解明し、農産物由来のPFAS摂取に係るリスク管理に資する科学的知見を得るという目標の達成に向け、順調に進んでいると言える。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題*番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	2 各種農作物へのPFAS移行特性の解明		
実行課題名	(1) 農地土壌、水等から農作物へのPFAS移行動態調査		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
共同研究機関・研究室・研究者名等	農研機構 食品研・細谷幸恵、農環研・前島勇治 大阪府環農水研 環境研究部・環境調査グループ・矢吹芳教、伴野有彩 兵庫県環境研 水環境科・梶 拓也、松村千里 農工大・本林隆、水川薫子 FAMIC・川西美穂、寺田昌市		

Ⅱ. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

国内の2か所以上の高濃度PFAS含有農地土壌を用いて、その農地土壌、水等のPFAS濃度及び、その環境下で栽培された4品目以上の農作物中のPFASについて調査し、農作物に移行しやすいPFAS分子種を特定するとともに、その移行特性を調べる。

2) 研究進捗状況

課題2-(1)では、農地土壌、水等から農産物へのPFAS移行動態調査のため、PFASの分子種や濃度分布が異なる畑地圃場で試験を実施することとしている。本年度の畑地試験においては、昨年度までのC地区、D地区に加えて、土性の異なるE地区においても栽培試験を開始し、課題1-(1)にて開発された分析手法を用い、農地土壌、農産物におけるPFASの分子種と濃度を分析した。なお、新たに試験地としたE地区に関しては、圃場内の1mメッシュ60地点において土壌濃度調査を実施し、その結果に基づき、土壌中のPFAS分子種やその濃度を考慮した試験デザインを行って栽培試験を実施した。これにより、土壌から農作物へのPFASの移行に関する知見が得られた。

3) 令和7年度の達成目標

比較的高濃度のPFASを含む農地土壌から農作物へのPFAS移行動態についての試験を実施する。本年度は高濃度に含有するPFASの分子種が異なる2種類の農地土壌を用いて、畑作物として根菜類、果菜類、葉菜類について栽培試験を実施する。適期に収穫した作物中のPFAS濃度を調べ、土壌から畑作物へのPFASの移行動態を解明する。

また、農作物（根菜類）の前処理に関し、付着土壌によってPFASの移行評価がどのように変動しうるかを明らかにする。

4) 令和7年度研究方法

ア) C地区（主にPFOAを高い濃度で含有する土壌）及びD地区（PFASを高い濃度で含有しない土壌）における栽培方法と試料調製方法

令和6年度に引き続き、主にPFOAを高濃度で含有する土壌を有するC地区、及びPFASを高濃度で含有しないD地区の畑地において、畑作物の栽培試験を実施した。

・栽培区画の設計と土壌試料の採取方法

C地区の畑地（以降、畑地C）における栽培区画の準備は以下のとおりである。耕耘機（刃30 cm、攪拌深さ15-20 cm）で土壌を攪拌した後、長さ15メートルの3つの畝を、それぞれ5メートルで3つに区切り、9つの試験区画を設けた。R6年度までに取得した圃場内区画のPFAS濃度データに基づき、各品目について少なくとも1区画は可能な限り高い濃度でPFOAを含む土壌条件となるよう栽培品目を割り付けた。なお、土壌濃度の把握のため、各品目の栽培開始時（播種または定植時）に1区画につき複数点の土壌を採取し、サンプルバッグ内で十分に混合したものを各区画の土壌試料とした。

D地区の畑地（以降、畑地D）についても概ね同様に準備及び土壌試料の採取を行った。畑地Dでは、畑地Cと比較して土壌中PFAS濃度が低く、栽培区画間の濃度差も小さかったことから、栽培区画の割付けにおいてPFAS濃度を考慮した区画配置は行わなかった。

・試験品目と栽培及び前処理方法

本年度、C地区及びD地区ではカボチャ、ナス、サツマイモ、ニンジン、ズッキーニ（R6年度の追試験）の5品目の栽培を実施した。なお、栽培期間中の水分供給は降雨を主体とし、土壌水分の不足により生育への影響が懸念される場合に限り、貯留雨水によるかん水を実施した。

それぞれの作物における収穫後の前処理方法は以下のとおりである。

1. カボチャ

収穫物の重量、径を測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体3点を選抜し、区画の試料とした。カボチャ試料は、水道水で十分に流水洗浄し、表面に付着した土壌などの異物を除去した後、超純水でさらに外表を水洗した。種子・ワタを除去し、皮部及び果肉部分を可食部試料とした。得られた試料は適当な大きさに切断した後、ホモジナイザーを用いて均質化し、その一部を分析用試料とした。

2. ニンジン

収穫物の重量、長さを測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね140 g程度）を複数選抜し、計1 kg以上を区画の試料とした。ニンジン試料は、表面に付着した土壌等を除去しながら水道水で流水洗浄し、超純水ですすいだ後、水切りした。両端部及びひげ根を切除した皮付きの試料を四分法で縮分し、適当な大きさに切断し、ホモジナイザーを用いて均質化し、その一部を分析用試料とした。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

3. サツマイモ

収穫物の重量、長さを測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね 250 g 程度）を複数選抜し、計 1 kg 以上を区画の試料とした。サツマイモ試料は、付着した土壤を除去するため水道水で十分に水洗した後、超純水でさらに外表を水洗した。両端部及びひげ根を除去した皮付きの試料を四分法で縮分し、適当な大きさに切断した後ホモジナイザーにより均質化し、その一部を分析用試料とした。

4. ナス

収穫物の重量、長さを測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね 110 g 程度）を複数選抜し、計 1 kg 以上を区画の試料とした。ナス試料は、水洗により表面の汚れを除去した後、超純水でさらに外表を水洗した。ヘタの部分除去し、皮付きのまま可食部全体を試料とした。試料を四分法で縮分し、適当な大きさに切断した後ホモジナイザーにより均質化し、その一部を分析用試料とした。

5. ズッキーニ

収穫物の重量、径を測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体を複数選抜し、区画の試料とした。ズッキーニは、外観異物を除去した後、必要に応じて洗浄し水分を拭き取った。ヘタの部分除去し、皮つきのまま可食部全体を試料とした。試料は四分法で縮分し、適当な大きさに切断した後ホモジナイザーを用いて十分に均質化し、その一部を分析用試料とした。

イ) E地区（主にPFOSを高い濃度で含有する土壌）における栽培方法と試料調製方法

令和6年度までに選定した、主にPFOSを高い濃度で含有する土壌を有する畑地Eにおいて、令和7年度より畑作物の栽培試験を開始した。

・栽培区画の設計と土壌試料の採取方法

圃場内 (15 m × 4 畝) の土壌中におけるPFAS分子種の分布を明らかにするため、1メートルメッシュの土壌調査 (計60点) を実施した。畑地E試験区における土壌採集方法を図2-1に示す。採取した土壌は十分に風乾し、分析に供した。この調査結果を元に、畝の長さ5 mを1区画として計12区画を設け、各品目につき2区画で栽培区画を割付けた。なお、2区画のうち、作物ごとに適した生育環境 (排水性や日照量等) を考慮の上、少なくとも1区画は可能な限り高濃度のPFOSを含む土壌条件となるよう、栽培区画を割付けた。

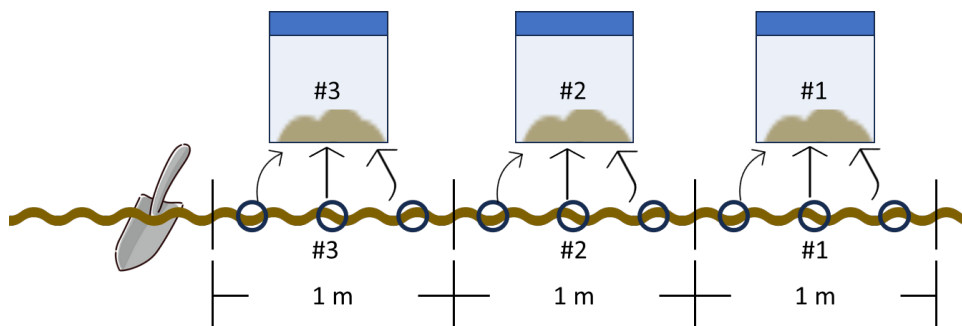


図 2-1. 畑地E試験区における土壌試料採集方法

・試験品目と栽培及び前処理方法

畑地Eではニンジン、ジャガイモ、ダイコン、ハウレンソウ、キャベツ、タマネ

ぎの6品目の栽培を実施した。なお、栽培期間中の水分供給は降雨を主体とし、土壌水分の不足により生育への影響が懸念される場合に限り、水道水によるかん水を実施した。

それぞれの作物における収穫後の前処理方法は以下のとおりである。なお、タマネギについては本報告書作成時点で収穫が完了していないため、記載していない。

1. ニンジン

収穫物の重量、長さを測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね160 g程度）を複数選抜し、計1kg以上を区画の試料とした。ニンジン試料は、表面に付着した土壌等を除去しながら水道水で流水洗浄し、超純水ですすいだ後、水切りした。両端部を切除した皮付きの試料を適当な大きさに切断し、ホモジナイザーを用いて均質化し、その一部を分析用試料とした。

2. ジャガイモ

収穫物の重量、長さを測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね130 g程度）を複数選抜し、計1 kg以上を区画の試料とした。付着した土壌等の異物を除去した後、スポンジを用いて水道水で十分に流水洗浄し、超純水ですすいだ後、表面水分を拭き取った。その後、長径に並行となるよう4分割のくし切りにし、対角となる2片を「皮付き部」とし、残る2片はピーラーで皮を除去し「皮無し部」とした。それぞれの試料はホモジナイザーを用いて十分に均質化し、その一部を分析用試料とした。

3. ダイコン

収穫物の重量、長さを測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね1 kg程度）を6本選抜し、区画の試料とした。水道水で十分に洗浄した後、超純水で表面を十分に洗浄した上で、四分法で縮分し、皮付きのダイコン、皮をむいたダイコン、皮のみの3種を準備した。それぞれをホモジナイザーにより粉砕、均質化し、その一部を分析用試料とした。

4. ホウレンソウ

収穫物の重量、長さを測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね40 g程度）を6束選抜し、区画の試料とした。試料は水道水で洗浄した後、超純水で表面を十分に洗浄し、赤根部を残して根切りした可食部とした。試料は適当な大きさに切断し、切断後の試料をホモジナイザーにより十分に均質化し、その一部を分析用試料とした。

5. キャベツ

収穫物の重量、径を測定し、その区画を代表する、市場流通品と同等の個体（概ね1 kg程度）を3玉選抜し、区画の試料とした。流水で洗浄し、超純水ですすいだ後、外葉変質葉や汚染の疑われる部分を除去し、表面の水分をふきとった。芯を除き、試料は四分法で縮分し、試料は適当な大きさに切断した後ホモジナイザーにより十分に均質化し、その一部を分析用試料とした。

ウ) 土壌及び農作物の分析方法

栽培土壌については、土壌分析法であるNARO 202201を一層簡便化した手法（NARO 202201.01）により分析した。また、畑作物は課題1—（1）で開発した分析法に準じて実施した。なお、本分析において対象とした30種PFASの定量下限値については、報告書末に別紙1として示した。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

5) 令和7年度研究結果

ア) 畑作物のPFAS動態解明 (C、D地区)

・土壤中に含まれる30種PFAS濃度

農地土壌の濃度を把握するため、栽培開始時（播種または定植時）に各区画から土壌を採取し、土壌分析に供した。昨年度までの分析結果と同様に、畑地CのPFAS濃度はPFOA>PFOSとなることを確認した。また、対照区となる畑地Dにおいても同様に土壌を採取し、畑地CよりもPFAS含有濃度が十分に低く、対照試験地として適切であることを確認した（図2-2）。

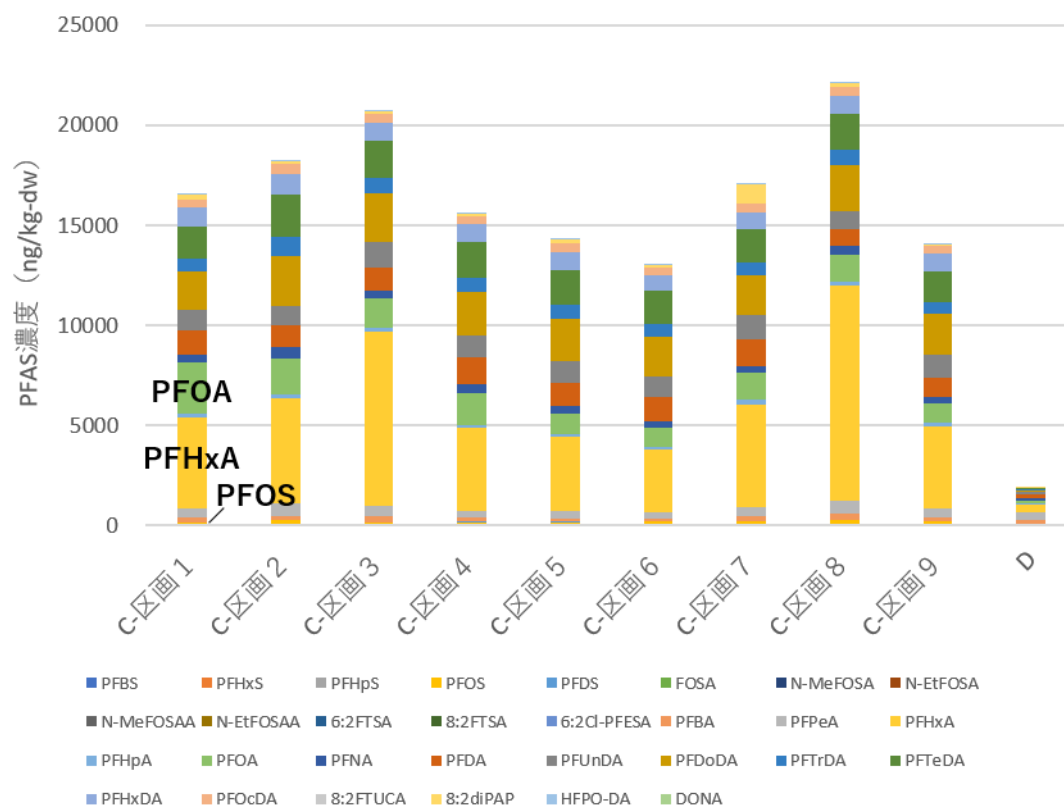


図2-2. 畑地C（区画1-9）及び畑地Dの農地土壌のPFAS濃度

・根菜類（サツマイモ、ニンジン）中のPFAS動態解明

本研究では、土壌から作物への移行の程度を評価するため、作物濃度を対応する土壌の乾燥土壌中全量濃度で除した値（Crop/Soil 比）を見かけの移行指標として算出した。なお、PFASの植物吸収は主として土壌溶液中の可溶態濃度及び化学物性に依存することが知られており、本指標は実際の移行プロセスを直接表すものではない点に留意が必要である。

結果を図2-3、2-4に示す。サツマイモについてはパーフルオロカルボン酸類（PFCAs）が他の農産物の場合に比べやや高い Crop/Soil 比で検出される傾向にあったが、Crop/Soil 比はほとんどの PFAS で1以下であった。また、ニンジンにおいては一部試料において 6:2FTSA の作物中濃度がやや高く検出され、見かけの移行の程度が大きくなったが、同一区画の試料内でのバラつきが大きく、再現性の確認を含め、移行性の考察には今後さらなるデータの取得が必要である。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

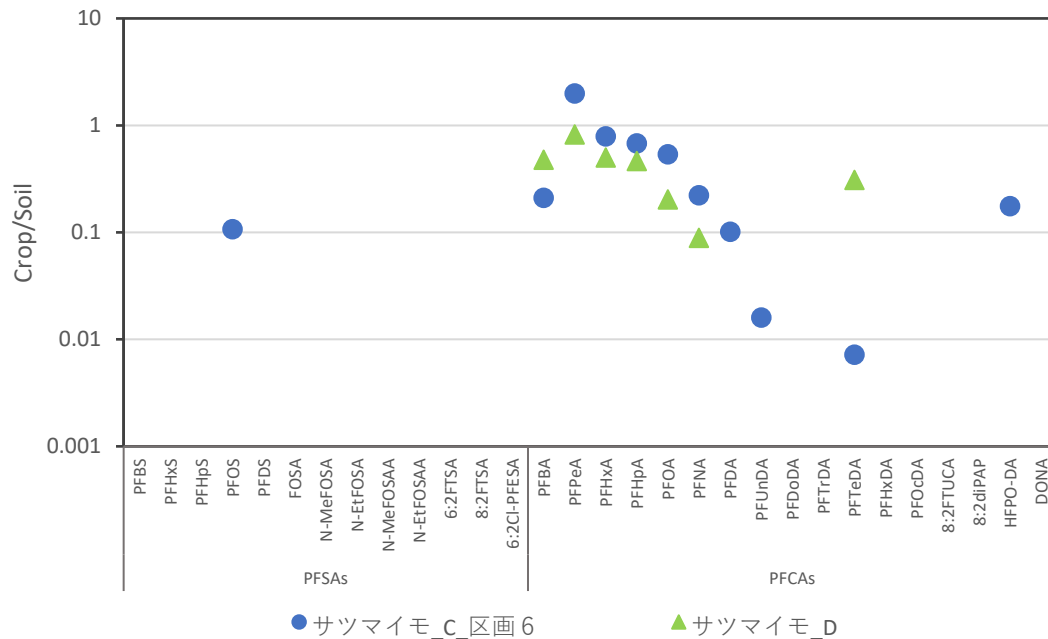


図2-3. 畑地C（区画6）及び畑地DのサツマイモにおけるPFAS濃度と栽培土壌中のPFAS濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。
*1試料につき3反復で分析し、その平均値を用いた。なお、3反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の2分の1の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

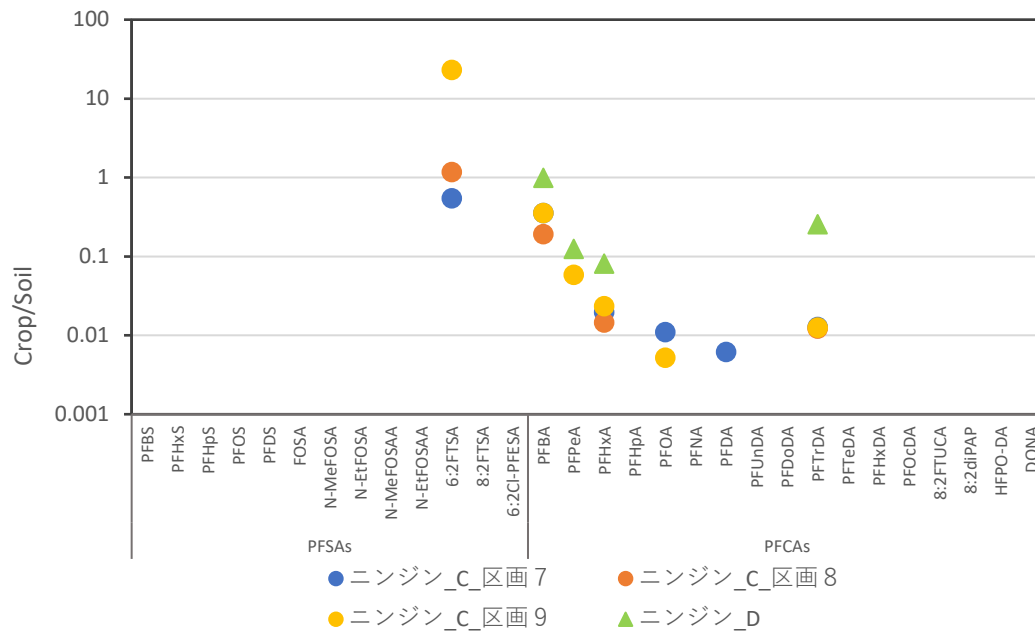


図2-4. 畑地C（区画7、8、9）及び畑地DのニンジンにおけるPFAS濃度と栽培土壌中のPFAS濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。
*1試料につき3反復で分析を実施し、その平均値を用いた。なお、3反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の2分の1の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

・果菜類（カボチャ、ナス、ズッキーニ）中のPFAS動態解明

果菜類についても同様に、見かけの移行指標として〔作物中のPFAS濃度/土壌中のPFAS濃度〕を算出した。結果を図2-5、2-6、2-7に示す。カボチャ、ナスの作物中からは、パーフルオロスルホン酸類（PFSAs）は定量下限値以上では検出されず、パーフルオロカルボン酸類（PFCAs）についても定量下限値以上で検出されるものの、Crop/Soil比はほとんどのPFASで1以下であった。

ズッキーニについては、PCB等の脂溶性環境汚染物質を蓄積しやすいとされるRaven（RA）品種と、蓄積しにくいとされるStarship（ST）品種で実施した。一部のPFSAsにおいて、Crop/Soil比が1以上と算出されたものの、これらのPFSAsの作物中濃度は低く、一方土壌中のこれらPFSAsの濃度が定量下限値付近の微量であったため、比率が見かけ上高く算出されたものと考えられた。したがって、PFSAsが作物中に高濃度で蓄積したことを示すわけではないことに留意が必要である。また、RA品種とST品種の間で、PFSAs及びPFCAsのCrop/Soil比に明確な差異は観察されず、ズッキーニにおいては、PFASの蓄積挙動はPCB等とは異なる可能性が示唆された。

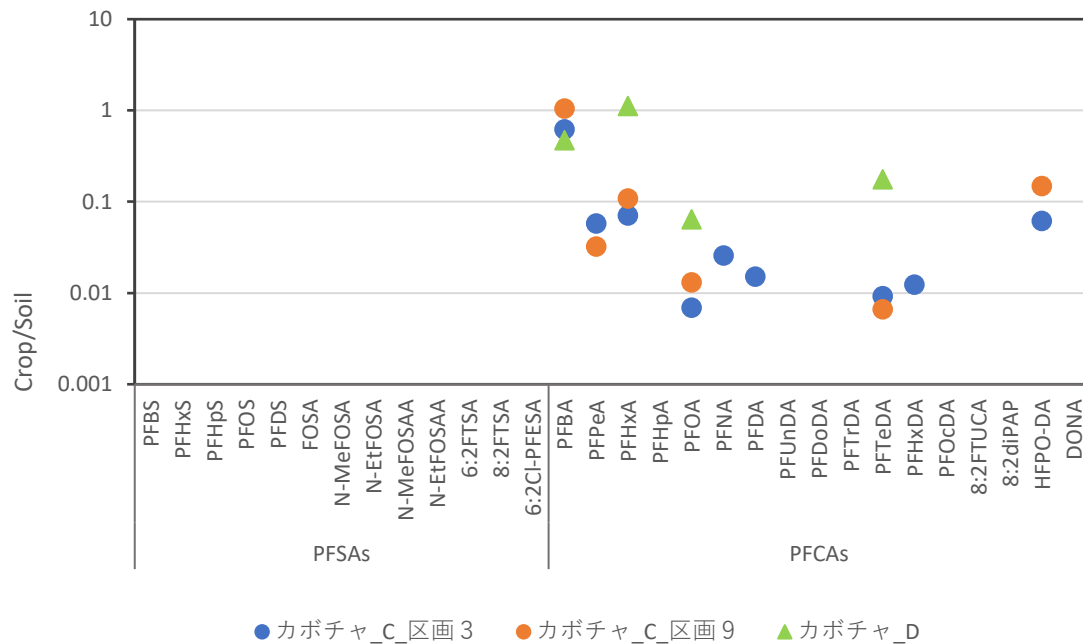


図2-5. 畑地C（区画3，9）及び畑地DのカボチャにおけるPFAS濃度と栽培土壌中のPFAS濃度の比率

*30種のPFASについて、〔農作物中のPFAS濃度〕/〔土壌中のPFAS濃度〕（縦軸）をプロットした。

*1試料につき3反復で分析を実施し、その平均値を用いた。なお、3反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の2分の1の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

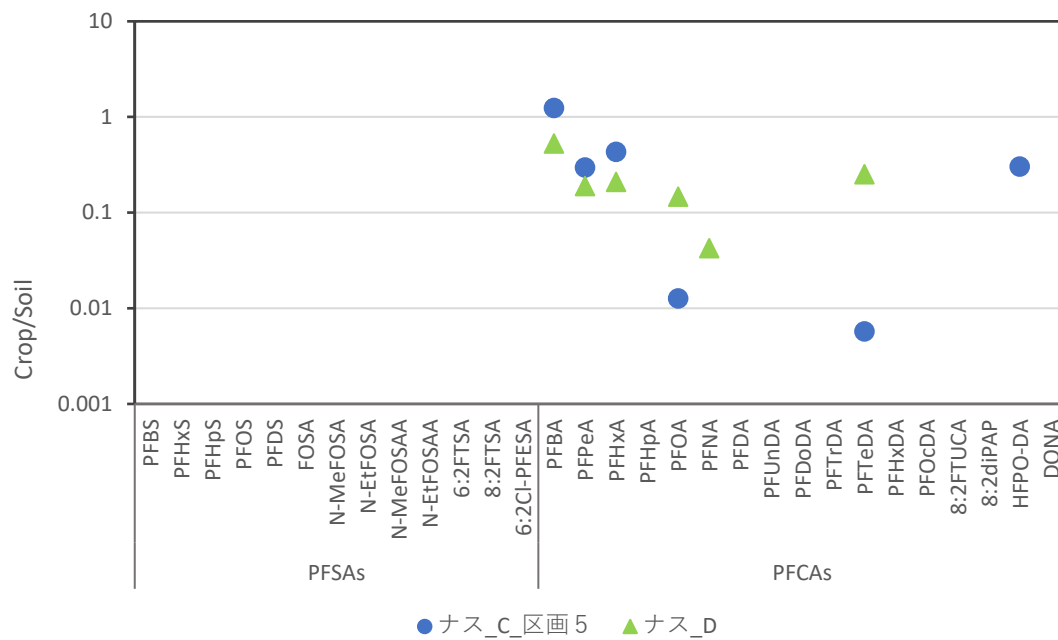


図2-6. 畑地C（区画5）及び畑地DのナスにおけるPFAS濃度と栽培土壌中のPFAS濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。

*1 試料につき3反復で分析を実施し、その平均値を用いた。なお、3反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の2分の1の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

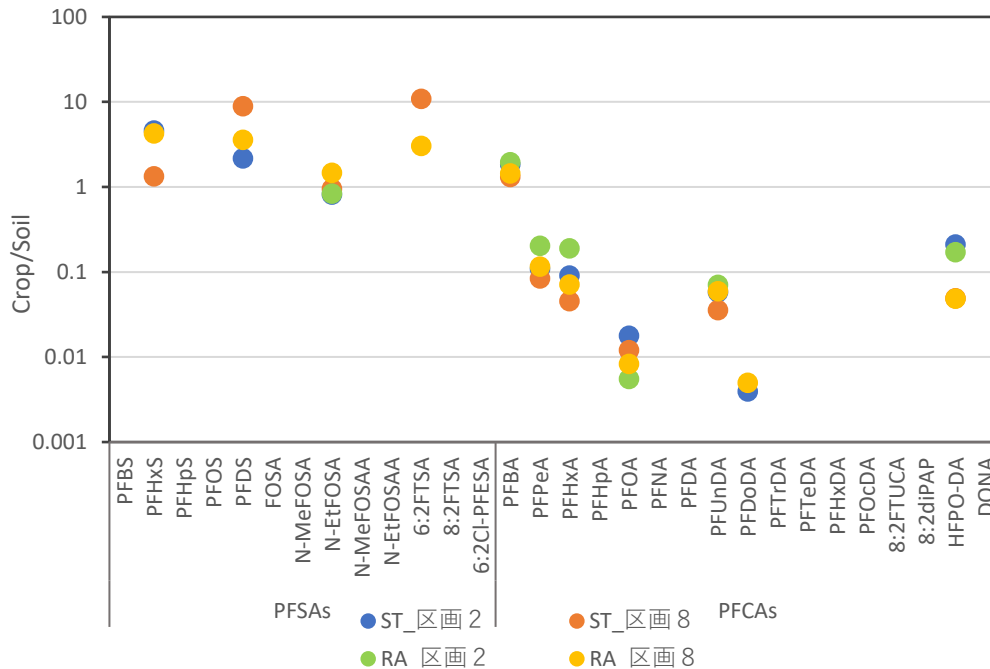


図2-7. 畑地C（区画2、8）のズッキーニ（ST品種、RA品種）におけるPFAS濃度と栽培土壌中のPFAS濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。

*1 試料につき3反復で分析を実施し、その平均値を用いた。なお、3反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の2分の1の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

イ) 畑作物のPFAS動態解明（畑地E）

- ・ 土壤中に含まれる30種PFAS濃度

畑地Eにおける圃場内土壌の各PFAS分子種の濃度の傾向を明らかにするため、1メートルメッシュで土壌を採取し（計60カ所）、土壌中PFAS濃度を測定した（図2-9）。その結果、畑地Eの土壌はPFOSを高濃度で含有することが確認された。これは、令和5年度に畑地Cで実施した1メートルメッシュの土壌調査と同様に、ひとつの圃場内においても位置によってPFAS濃度が不均一に分布していることを示している。特に、PFOSについては、土壌地点によって約2倍の濃度差（10082- 20586 ng/kg-dry wt.）が認められた（図2-10）。本結果に基づき、各品目の栽培区画の割付を行った。

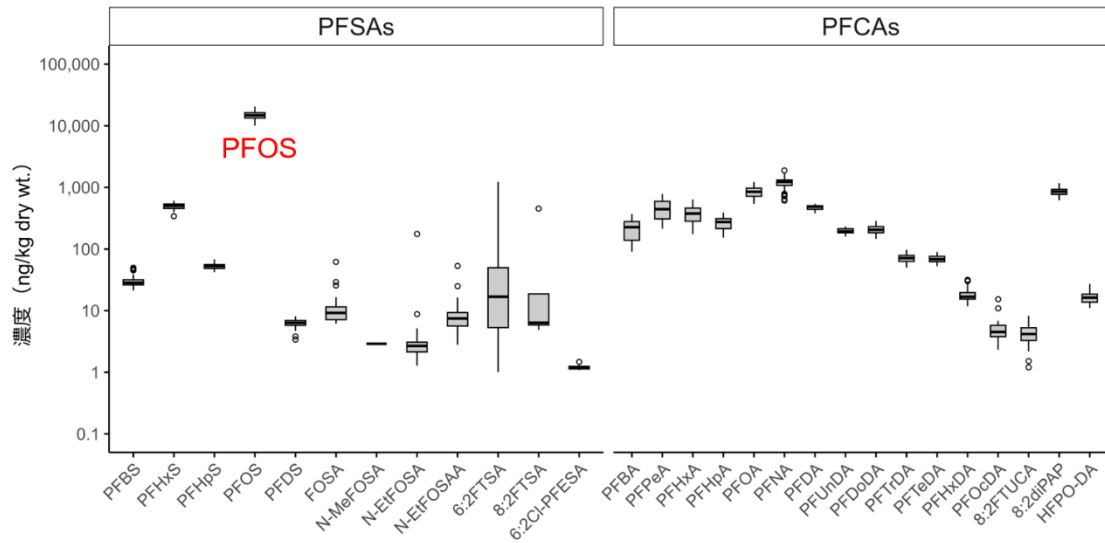


図2-9. 畑地Eにおける1メートルメッシュの土壌中PFAS分析（N=60）の結果
栽培土壌中のPFAS 1成分ごとの濃度の箱ひげ図（左：PFASs、ペルフルオロスルホン酸類、右：PFCAs、ペルフルオロカルボン酸類）

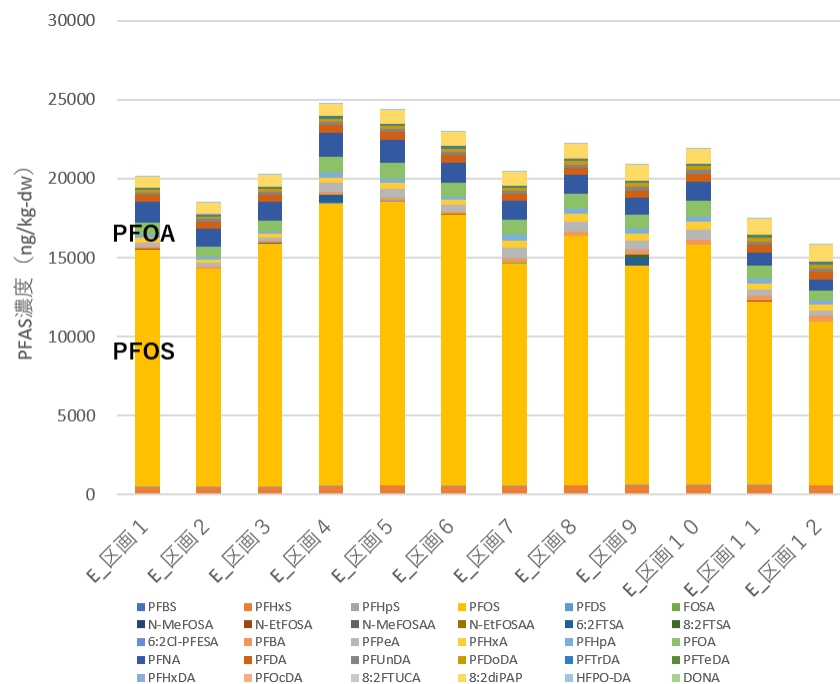


図2-10. 畑地E（区画1-12）の農地土壌のPFAS濃度

・根菜類（ニンジン、ジャガイモ、ダイコン）中のPFAS動態解明

畑地C及びDと同様に、土壌から作物への移行の程度を評価するため、作物濃度を対応する土壌の乾燥土壌中全量濃度で除した値（Crop/Soil比）を見かけの移行指標として算出した。結果を図2-11、図2-12及び図2-13に示す。

ニンジンでは、畑地Cと同様にPFCAsが検出される傾向が認められた。短鎖PFASであるPFBAではCrop/Soil比が最大で0.6を示し、他の分子種と比較して移行傾向が示唆され、その作物中濃度はおよそ80 ng/kgであった。また、PFASsではPFOSが微量検出されたものの、Crop/Soil比は約0.001と低い値であった。この値には試料表面に付着した土壌を完全に除去できなかった影響が含まれている可能性があることから、PFOSを高濃度に含有する土壌条件下においても、ニンジンへの移行程度は限定的であることが示された。

ジャガイモについては、皮付き試料及び皮を除去した試料の2種類を調製し、分析に供した。その結果、短鎖PFASであるPFBSではCrop/Soil比が1近傍を示し、比較的移行しやすいことが示唆されたが、その作物中濃度はおよそ15 ng/kgであり、低い値であった。全ての試料でPFOSは定量下限未満であった。一方で、皮の有無による濃度差は小さく、PFAS濃度に対する表皮の影響は限定的であることが確認された。

ダイコンについては、皮付き試料、皮除去試料及び皮のみの試料の3種類を調製した。PFHxA、PFHpAなど一部のPFCAsにおいて、剥いた皮が皮つきの身や皮を剥いた身より比較的高濃度であったほかは、顕著な差はなく、大部分のPFASでCrop/Soil比は1以下であった。また、PFOSが微量検出されたものの、Crop/Soil比はいずれの試料においても0.001未満であり、極めて低い値を示した。これらの結果から、ダイコンにおいてもPFOSの移行程度は低いことが示された。

以上の結果から、PFASの土壌から根菜類への移行性は化合物によって異なり、PFOSなどの長鎖PFASでは、土壌中に高濃度で含まれていたとしても移行性は低く、一方でPFBAやPFBS等の一部短鎖PFASでは比較的移行しやすい可能性が示唆された。これらの知見は、PFASの化学構造と作物への移行特性との関係を理解するうえで重要な基盤的情報となるものである。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

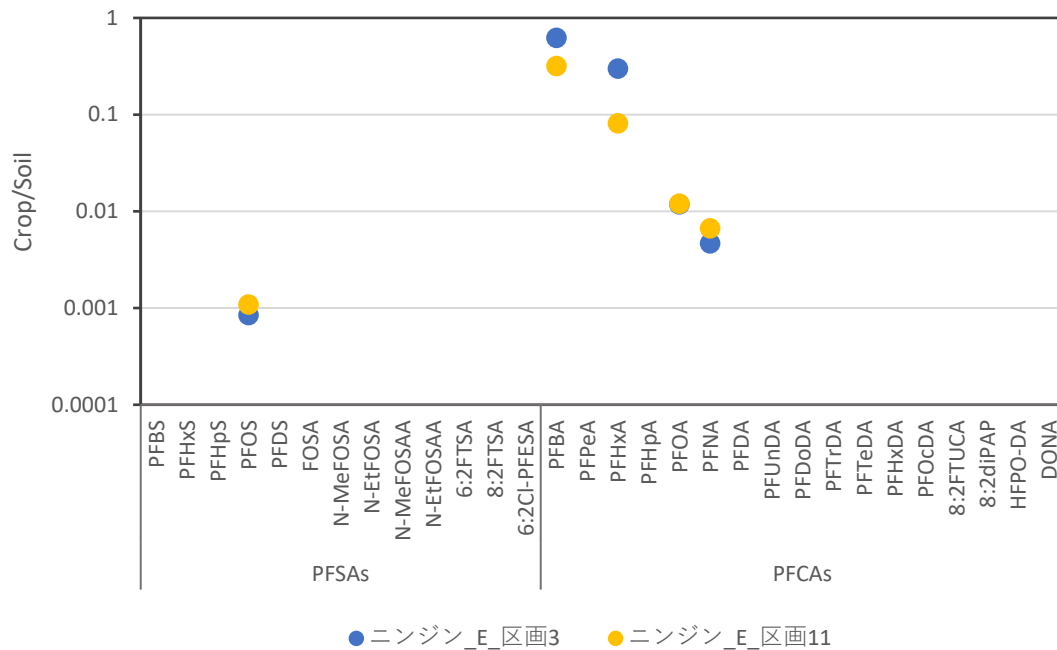


図 2-11. 畑地E（区画 3、11）のニンジンにおけるPFAS濃度と栽培土壌中のPFAS濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。

*1 試料につき3反復で分析を実施し、その平均値を用いた。なお、3反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の2分の1の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

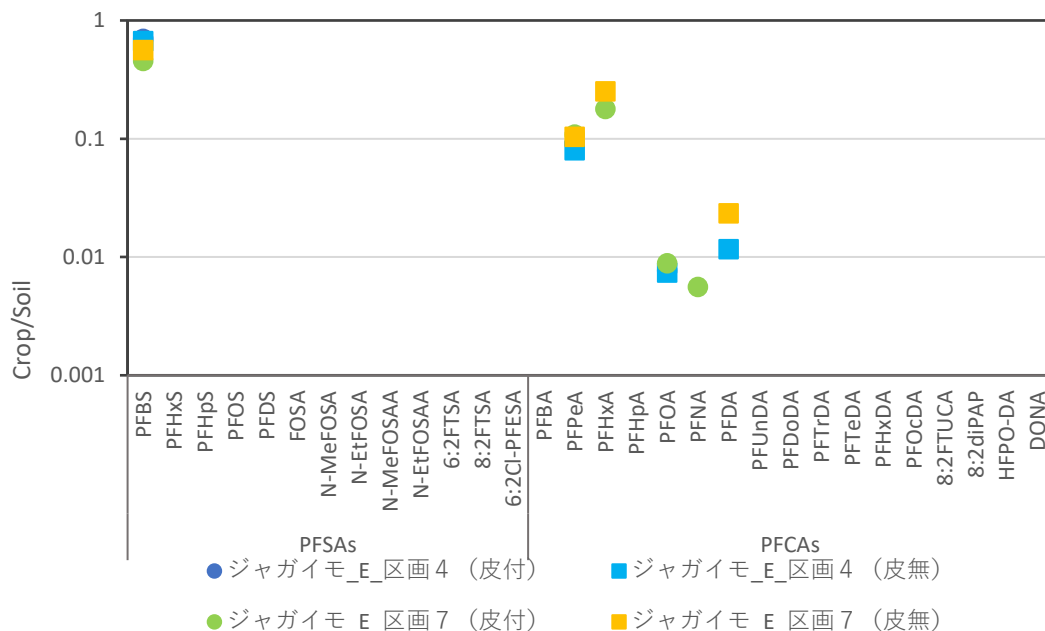


図 2-12. 畑地 E（区画 4、7）のジャガイモにおける PFAS 濃度と栽培土壌中のPFAS 濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。

*1 試料につき3反復で分析を実施し、その平均値を用いた。なお、3反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の2分の1の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

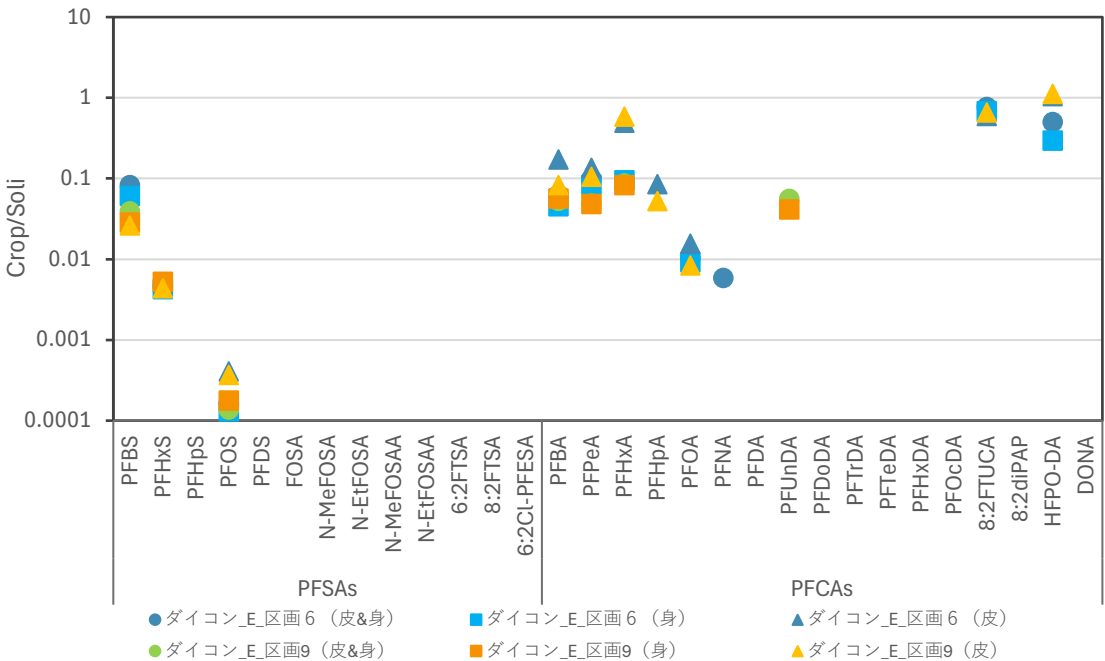


図 2-13. 畑地 E (区画 6、9) のダイコンにおける PFAS 濃度と栽培土壌中の PFAS 濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。

*1 試料の分析反復数は1とし、得られた測定値を比率の算出に用いた。

*農産物または土壌のいずれかにおいて、定量下限値未満であった分子種については、プロットせず空白とした。

・葉菜類（キャベツ、ホウレンソウ）中のPFAS動態解明

畑地Eの葉菜類（キャベツ及びホウレンソウ）についても同様に、作物中濃度を土壌中の全量濃度で除した値（Crop/Soil比）を算出した。結果を図2-14及び図2-15に示す。

キャベツでは、パーフルオロアルキルスルホン酸類 (PFASs) は定量下限未満となった。一方、パーフルオロカルボン酸類 (PFCAs) のうち、短鎖PFASのPFPeA及びPFHxAについては定量下限以上で検出されたが、Crop/Soil比は0.1から0.2程度であり、移行は限定的であると考えられた。

ハウレンソウでは、PFOSが定量下限値付近の濃度で検出されたが、そのCrop/Soil比は0.0001と極めて低い値を示し、また、PF0AのCrop/Soil比は約0.01であったことから、これら2種の移行性は低いと考えられる。一方で、短鎖PFASについては、PFSA類のPFBS及びPFCA類のPFBA、PFPeA、PFHxA、PFHpAにおいて、Crop/Soil比が0.1～1程度の範囲で検出された。また、区画8の試料の6:2FTSAにおいて、Crop/Soil比が10以上で算出されたものの、比率の分母となる土壤中の6:2FTSA濃度(5 ng/kg)は低く、かつ作物中の6:2FTSA濃度の分析値の3反復の誤差が大きかったことから、見かけ上、比率が高く算出されたものと考えられた。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

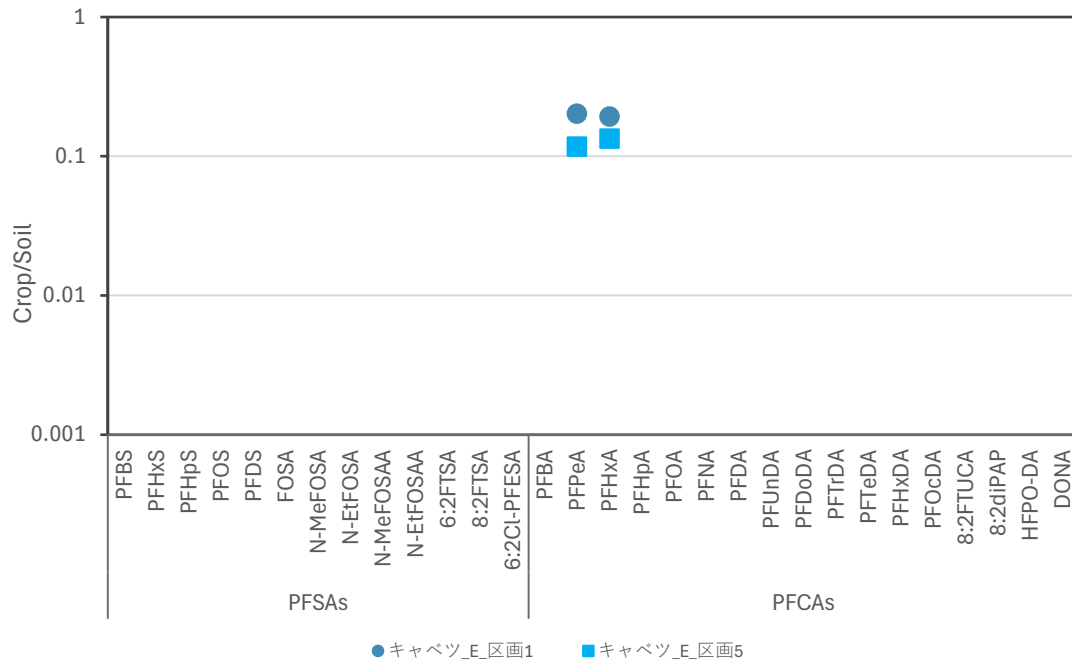


図 2-14. 畑地 E（区画 1、5）のキャベツにおける PFAS 濃度と栽培土壌中の PFAS 濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。
*1 試料につき 3 反復で分析を実施し、その平均値を用いた。農産物または土壌のいずれかにおいて、3 反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

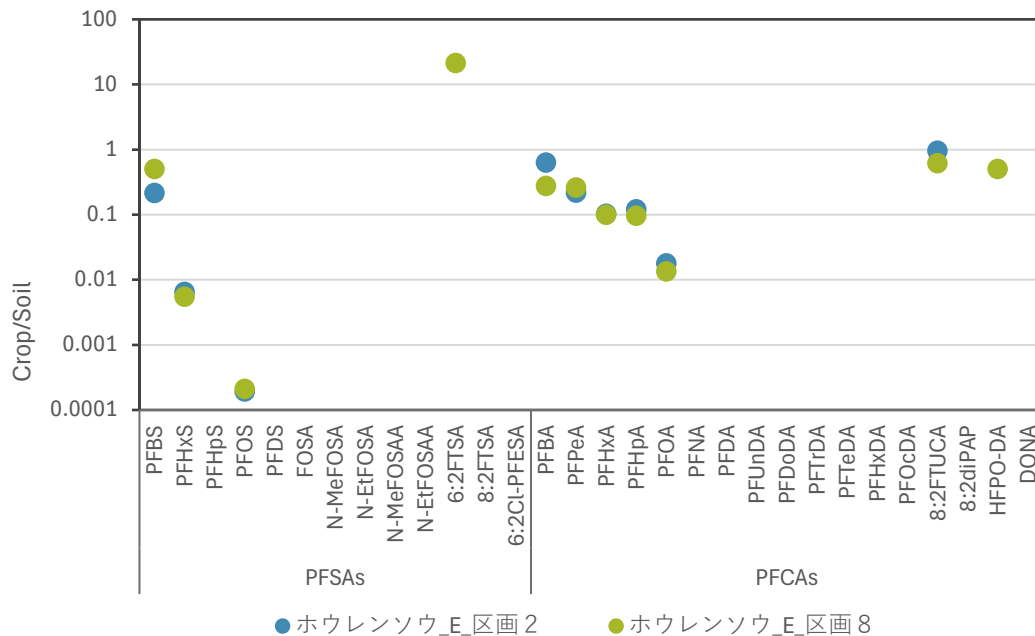


図 2-15. 畑地 E（区画 2、8）のハウレンソウにおける PFAS 濃度と栽培土壌中の PFAS 濃度の比率

*30種のPFASについて、[農作物中のPFAS濃度]/[土壌中のPFAS濃度]（縦軸）をプロットした。
*1 試料につき 3 反復で分析を実施し、その平均値を用いた。なお、3 反復のうち定量下限値未満となったものについては定量下限値の 2 分の 1 の値を代入して平均値を算出した。ただし、農産物または土壌のいずれかにおいて、3 反復の全てが定量下限値未満であった場合は、当該分子種はプロットせず空白とした。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

ウ) PFASの移行特性について

以上、主にPFOAを高濃度で含有する土壌を有する農地で栽培したカボチャ、ニンジン、サツマイモ、ナス及びズッキーニ、並びに主にPFOSを高濃度で含有する土壌を有する農地で栽培したニンジン、ジャガイモ、ダイコン、ホウレンソウ及びキャベツについて分析を行った結果を報告した。その結果、いずれの農作物においても、PFOS及びPFOAのCrop/Soil比は非常に小さく、PFOS又はPFOAを高濃度で含む農業環境でこれら農作物を栽培しても、農作物中のPFOS及びPFOAの濃度は低くなることが強く示唆された。

一方、PFBSやPFBA等の一部の短鎖PFASでは、品目によって比較的移行しやすい傾向が示唆されたものの、Crop/Soil比が1を大きく超える値は認められず、顕著な蓄積傾向は確認されなかった。

また、PFSA類と比較した場合、PFCA類のCrop/Soil比が高い傾向が観察されたが、一般に、PFCA類には水溶性の高い化合物が多く含まれることから、土壌中から作物への移行性に影響を及ぼした可能性が考えられた。さらに、今回の結果では、根菜類、果菜類及び葉菜類といった野菜分類による移行性の違いは大きくなく、野菜の種類よりもPFAS分子種の違いの方が移行性に大きく影響することが示唆された。

以上の結果は、PFASの作物への移行特性及びその移行メカニズムを理解するうえで重要な基盤的知見となるものである。

6) 現時点における令和7年度達成目標から見た問題点と令和8年度の達成目標

問題点は特になし。各種農作物へのPFAS移行特性の解明のため、令和8年度も引き続き、異なる2種の高濃度PFAS土壌の試験現場における各種農作物の栽培を実施し、土壌、水等から農作物へのPFAS移行特性の把握を進める。

7) 最終目標の達成見込み

土壌、水等からの農作物へのPFAS移行については多様な農地土壌中のPFAS分子種や濃度などの新たな知見が得られ、最終目標である動態の全容解明に向けた基盤作りが計画通りに進行している。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

課題番号	23812803	課題 研究期間	令和5～9年度
実行課題*番号		実行課題 研究期間	令和5～9年度
契約課題名	農産物中PFASの分析法の確立、農地土壌、水等からのPFAS移行特性の解明		
小課題名	2 各種農作物へのPFAS移行特性の解明		
実行課題名	(2) 農作物へのPFAS吸収・移行のメカニズムの解明		
小課題 代表研究機関・研究室・研究者名	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		
実行課題 代表研究機関・研究室・研究者名	神戸大・バイオシグナル総合研・シグナル分子応答研究部門・乾 秀之		
共同研究機関・研究室・研究者名等	農研機構 高度分析研究センター・環境化学物質分析ユニット・殷 熙洙		

II. 実行課題ごとの研究進捗状況等

1) 研究目的

キャベツ／ブロッコリー（アブラナ科）、ハウレンソウ（ヒユ科）の導管液に含まれるPFOS及びPFOA濃度を定量する。また、ウリ科作物が持つMLP（Major latex-like protein）とPFOS及びPFOAの結合確認を行い、MLPがPFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能しているか調べる。

2) 研究進捗状況

PFOSもしくはPFOAを含む水を与えた際の、キャベツ／ブロッコリー（アブラナ科）、ハウレンソウ（ヒユ科）の導管液におけるPFOS及びPFOAの濃度を明らかにするとともに、アブラナ科作物においてもPFASの移行を促進する機構の存在が示唆された。また、*in silico*ドッキングシミュレーションにより、ウリ科植物MLPとPFOS及びPFOA、ならびに炭素鎖の異なるPFASの結合が予想された。

3) 令和7年度の達成目標

ウリ科作物が持つ汚染物質輸送因子MLPとPFOS及びPFOA、ならびに炭素鎖の異なるPFASの結合を調べ、MLPがPFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能するかを突き止め、農作物におけるPFOS及びPFOAの吸収・移行を解明するエビデンスを見出す。また、キャベツ／ブロッコリー（アブラナ科）、ハウレンソウ（ヒユ科）についてもPFOS及びPFOAの吸収・移行に関して調査し、作物種によるPFOS及びPFOAの吸収・移行の差異を明らかにすることを目標とする。

4) 令和7年度研究方法

2科3種の非ウリ科作物（キャベツ／ブロッコリー、ホウレンソウ）を人工気象器において4週間栽培し、栽培終了前日に、PFOSもしくはPFOAを10 ppmの濃度で含む水を各作物に与えた。翌日、茎を切断し、切断した茎から導管液を2日間採取した後、採取した導管液に含まれるPFOS及びPFOA濃度をLC-MS/MSにより定量した。

SDS-PAGEを用いたタンパク質の分離については、各種作物から採取した導管液を、SDSを含むサンプルバッファーと混合してボイル後電気泳動し、銀染色により検出した。

ウリ科作物MLPとPFOS及びPFOA、ならびに炭素鎖の異なるPFASの結合強度を *in silico* ドッキングシミュレーションにより評価した。AlphaFold2で構築したMLPの立体構造とPubChemから取得したPFASの構造を用いて、結合自由エネルギーの算出をAutoDock Vinaにより行った。

5) 令和7年度研究結果

いずれの作物の導管液においても、PFOSよりもPFOAの平均濃度が高かった（図2-20）。これにはPFOS、PFOAの水溶解性の違いが影響していると考えられる。PFOAの導管液濃度に関して、ウリ科作物は58.8-209 ng/mL、アブラナ科作物は28.4-306.5 ng/mLであった。また、PFOSの導管液濃度では、アブラナ科作物の方が他科の作物よりも高い傾向を示した。一方、ホウレンソウはPFOS、PFOAいずれの濃度もウリ科作物よりも低かった。以上の結果から、アブラナ科作物にもウリ科作物同様の特徴的な移行を促進するメカニズムが存在する可能性があると考えられる。

そこで、研究に使用した作物の導管液に含まれるタンパク質を分離するために、SDS-PAGEを行った（図2-21）。その結果、ウリ科作物にはその分子量からMLPと予想される複数の、しかも大量のタンパク質が存在することが明らかとなった。一方、非ウリ科作物の導管液では、ホウレンソウでわずかにタンパク質が検出されたものの、その他作物では導管液にタンパク質がほとんど存在しないことが明らかとなった。これら結果から、タンパク質ではない導管液成分がアブラナ科作物におけるPFOS及びPFOAの移行を促進している可能性が考えられた。

一方、ウリ科作物MLPと炭素鎖の異なるPFASの *in silico* ドッキングシミュレーションを行ったところ、MLPの内部キャビティー容積（リガンドが入り込める空間の大きさ）が大きいほど、長鎖PFASとの結合エネルギーが低くなる傾向が認められた（表2-1、2-2）。また、キャビティー容積の大きいMLP（CmMLP3、CpMLP-GR3）を有するかぼちゃ及びズッキーニでは、同一鎖長で比較した場合、長鎖PFSAよりも長鎖PFCAの方が結合エネルギーが低い傾向が認められた。これらの結果は、ズッキーニ及びかぼちゃにおいて導管液中のPFOA濃度がPFOS濃度より高かった要因の一つである可能性が考えられる。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

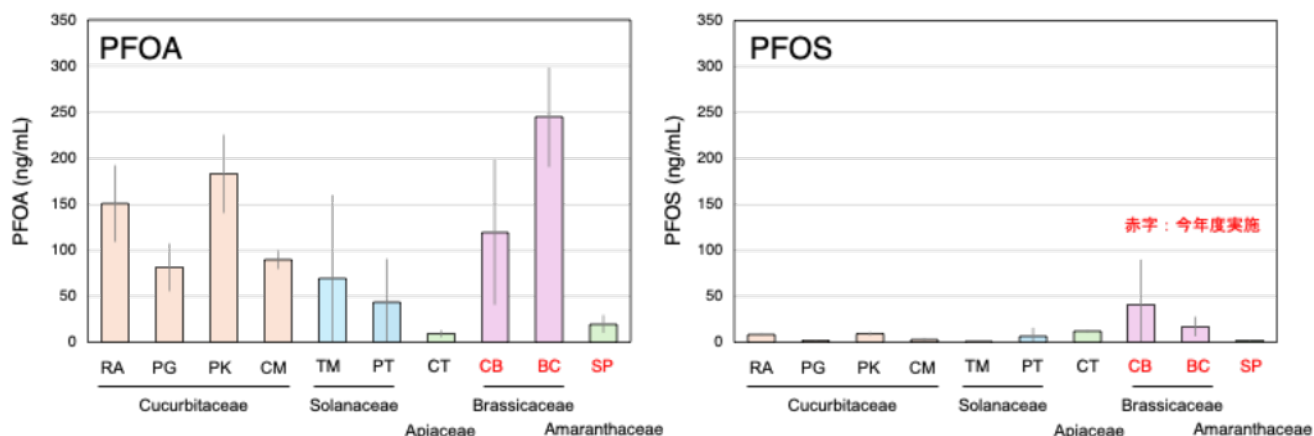


図2-20 PFOA及びPFOSを与えた各種作物の導管液中PFAS濃度
各試料導管液のPFOA及びPFOS濃度を示した（各作物につき独立栽培試料としてn= 3-4）。

RA, ブッキーニRA品種; PG, ブッキーニPG品種; PK, かぼちゃ; CM, きゅうり; TM, トマト;
PT, じゃがいも; CT, にんじん; CB, キャベツ; BC, ブロッコリー; SP, ホウレンソウ

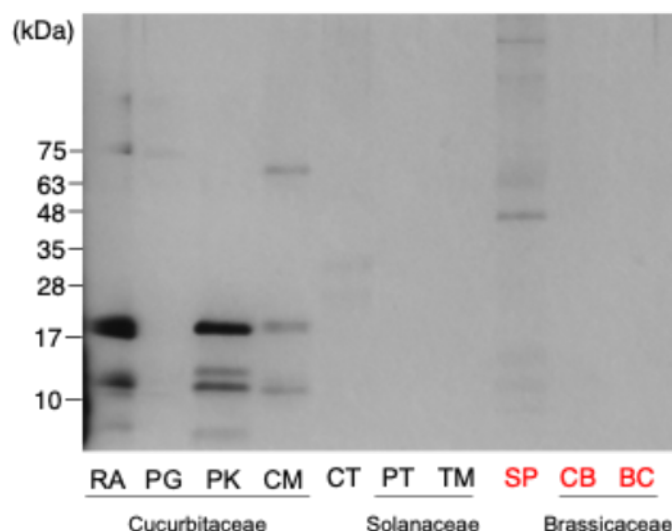


図2-21 各種作物の導管液に含まれる、SDS-PAGEを用いたタンパク質の分離
RA, ブッキーニRA品種; PG, ブッキーニPG品種; PK, かぼちゃ; CM, きゅうり; TM, トマト;
PT, じゃがいも; CT, にんじん; CB, キャベツ; BC, ブロッコリー; SP, ホウレンソウ

表2-1 各種ウリ科作物MLPと炭素鎖長の異なるペルフルオロアルキルカルボン酸の *in silico*ドッキングシミュレーション

Plant	MLP	Cavity size (Å ³)	Linear perfluoroalkyl carboxylic acid -COOH													
			C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C16	C18	
Loofah	LcMLP2	40.0	-6.6	-7.7	-7.7	-7.9	-7.1	-6.7	-4.7	-4.0	-2.8	1.3	4.3	8.3	15.0	
Figleaf squash	CfMLP1	52.9	-7.3	-8.6	-9.5	-10.2	-9.8	-8.8	-7.3	-4.4	-3.0	-0.8	2.0	8.4	15.1	
Pumpkin	CmMLP1	53.4	-7.2	-8.2	-9.1	-9.4	-9.0	-8.3	-6.2	-4.0	-2.7	-1.5	0.9	6.7	10.1	
Cucumber	CpMLP-PG1	57.7	-7.2	-8.3	-9.2	-9.4	-9.3	-9.0	-7.7	-5.6	-4.0	-1.0	-0.6	6.5	9.9	
Zucchini	CmMLP3	69.3	-7.4	-8.5	-9.4	-10.4	-11.0	-10.3	-10.4	-7.7	-6.2	-4.3	-2.4	2.2	8.2	
Zucchini	CpMLP-GR3	99.7	-6.6	-7.7	-8.5	-9.9	-10.0	-10.8	-10.7	-10.7	-11.0	-10.8	-10.8	-8.9	-7.7	

表中の数字は結合自由エネルギー (kcal/mol) を示す。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

表2-2 各種ウリ科作物MLPと炭素鎖長の異なるペルフルオロアルキルスルホン酸の *in silico*ドッキングシミュレーション

Plant	MLP	Cavity size (Å ³)	Linear perfluoroalkyl sulfonic acid -SO ₃ H					
			C4	C5	C6	C7	C8	C10
Loofah	LcMLP2	40.0	-7.7	-7.0	-6.6	-6.6	-5.3	-1.4
Figleaf squash	CfMLP1	52.9	-9.2	-9.4	-9.3	-8.2	-6.9	-3.8
Pumpkin Cucumber Zucchini Loofah	CmMLP1	53.4	-8.4	-8.8	-8.7	-7.4	-6.4	-3.3
Zucchini	CpMLP-PG1	57.7	-8.8	-9.1	-9.0	-8.2	-8.0	-4.3
Pumpkin	CmMLP3	69.3	-8.6	-9.4	-9.7	-9.3	-10.1	-7.5
Zucchini	CpMLP-GR3	99.7	-7.8	-8.8	-9.6	-10.1	-9.8	-10.2

表中の数字は結合自由エネルギー (kcal/mol) を示す。

6) 現時点における令和7年度達成目標から見た問題点と令和8年度の達成目標

ウリ科作物（ズッキーニ、かぼちゃ、きゅうり）及び非ウリ科作物（アブラナ科：キャベツ／ブロッコリー、ヒユ科：ホウレンソウ）の導管液に含まれるPFOS及びPFOA濃度を測定し、キャベツ、ブロッコリーでPFOS濃度が高いなど、作物種による差異を明らかにした。また、*in silico*でPFASとMLPの結合強度を示すことで、PFAS地上部輸送へのMLPの関与を支持するデータを得た。実際の植物体内におけるPFASの移行・蓄積機構との関係については、さらなる検証が必要である。

令和8年度はダイズ（マメ科）、タマネギ（ヒガンバナ科）、サツマイモ（ヒルガオ科）、とうもろこし（イネ科）を用いて、PFOS及びPFOAの吸収・移行を調査し、農作物種によるPFOS及びPFOAの吸収・移行の差異を明らかにする。ウリ科作物から発見された汚染物質輸送因子MLPが、PFOS及びPFOAのトランスポーターとして機能するか明らかにする。

7) 最終目標の達成見込み

ウリ科作物や非ウリ科作物に対するPFOS及びPFOAの導管液中の濃度を明らかにし、*in silico*ドッキングシミュレーションにより、MLPとPFOS及びPFOAとの結合強度を明らかにした。MLPのPFOS及びPFOAのトランスポーターとしての機能を示唆するデータを蓄積できたことから、最終目標の達成に着実に近づいていると言える。

※本報告書の内容は、令和7年度における試験研究結果を取りまとめたものです。
今後、試験法や解析法の再検討等により、必要に応じて修正を行う可能性があります。

別紙 1

	定量下限値			
	畑地E試料		畑地C、D試料	
分子種	農作物 (ng/kg)	土壌 (ng/kg乾燥重)	農作物 (ng/kg)	土壌 (ng/kg乾燥重)
PFBS	1.1	1.1	2.2	2.6
PFHxS	2.0	2.0	3.6	2.5
PFHpS	1.4	1.4	2.3	1.8
PFOS	1.5	1.5	9.1	7.1
PFDS	1.7	1.7	2.5	9.7
FOSA	1.3	1.3	5.9	2.1
<i>N</i> -MeFOSA	1.8	1.8	14.0	10.0
<i>N</i> -EtFOSA	2.3	2.3	8.8	7.0
<i>N</i> -MeFOSAA	1.7	1.7	8.4	7.7
<i>N</i> -EtFOSAA	1.9	1.9	7.4	12.5
6:2 FTSA	1.5	1.5	11.3	9.8
8:2 FTSA	1.9	1.9	13.3	1.2
6:2 Cl-PFESA	1.7	1.7	2.2	3.7
PFBA	1.9	1.9	12.1	6.7
PFPeA	9.5	9.5	4.8	2.7
PFHxA	2.4	2.4	8.7	2.2
PFHpA	12.2	12.2	9.2	3.3
PFOA	5.8	5.8	2.4	1.6
PFNA	6.5	6.5	12.4	3.1
PFDA	6.1	6.1	8.1	2.2
PFUnDA	6.6	6.6	6.2	12.8
PFDoDA	10.0	10.0	6.5	2.8
PFTTrDA	11.6	11.6	2.4	2.6
PFTeDA	5.4	5.4	1.9	3.1
PFHxDA	5.8	5.8	1.2	8.3
PFOcDA	7.4	7.4	3.5	1.4
8:2 FTUCA	1.3	1.3	2.2	0.5
8:2 diPAP	1.7	1.7	7.2	1.8
HFPO-DA	1.9	1.9	6.3	6.4
DONA	1.4	1.4	6.4	2.0

なお、定量下限値は分析ロット毎に算出しているため、畑地E試料及び畑地C、D試料分析時で異なる値となっている。