

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。

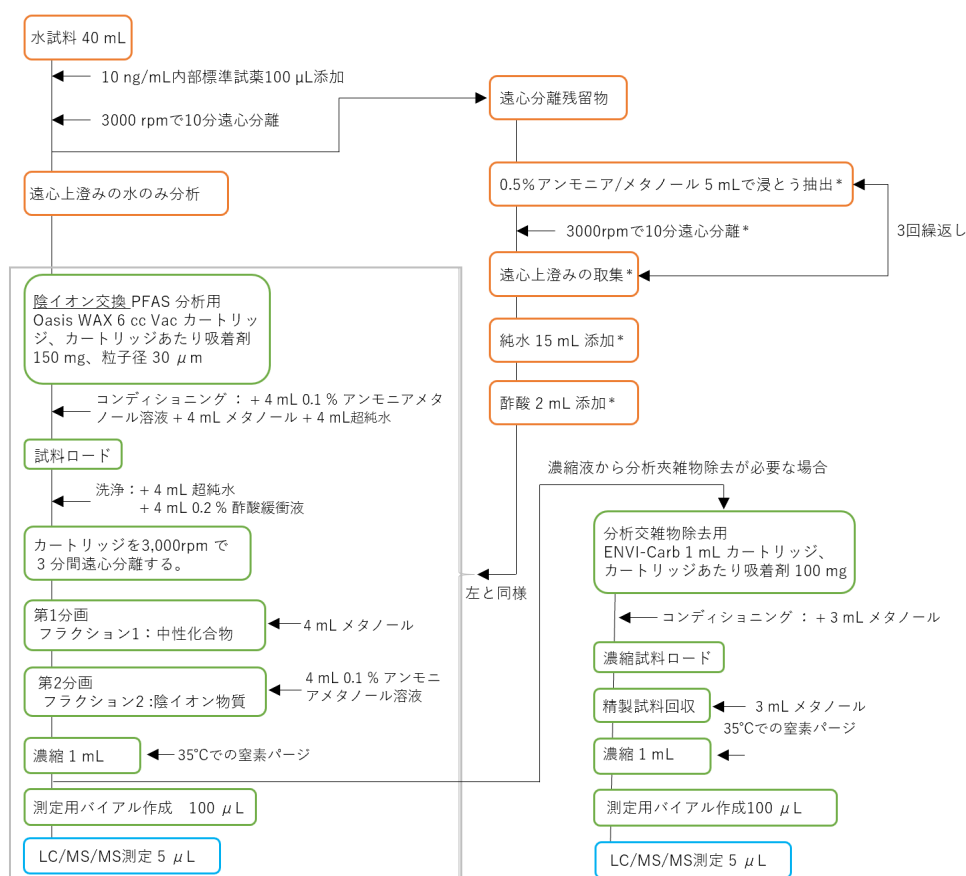


図1 農業用水における多成分PFAS一斉分析法の分析工程図

*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。

PFAS分析工程	米 根菜類（じゃがいも、さつまいも）	果菜類（きゅうり、ズッキーニ）	根菜類（ダイコン） 果菜類（トマト（ミニトマトを含む）） 葉菜類（ほうれんそう、キャベツ）
試料採取			
洗浄、粉砕、コンボット試料作成			
量り取り	5 g		
内標添加	標識化PFAS 10 ng/mL x 0.1 mL		
振盪抽出1	アセトニトリル 10 mL, 30分		
遠心分離	3,000 rpm, 10分 →抽出液1		
沈澱振盪抽出2	アセトニトリル 10 mL, 30分		
遠心分離	3,000 rpm, 10 min →抽出液2		
沈澱振盪抽出3	0.5% アンモニア/メタノール 10 mL, 30分		アセトニトリル 10 mL, 30分
遠心分離	3,000 rpm, 10分 →抽出液3		
上清濃縮	抽出液（1+2+3）を5 mLになるまで35℃で窒素吹付け		
希釈	超純水で45 mLにメスアップ	超純水で15 mLにメスアップ	超純水で15 mLにメスアップ
中和	酢酸 0.2 mL		
固相抽出1	陰イオン交換（Oasis WAX, 6 mL, 150 mg, 30 um）カートリッジ		
コンディショニング	0.1%アンモニアメタノール 4 mL メタノール 4 mL 水 4 mL		
試料ロード			
精製	水 4 mL 0.2% 酢酸緩衝液 4 mL カートリッジ遠心 3,000 rpm, 2分		
分画1	メタノール 4 mL →中性PFAS		
分画2	0.1% アンモニア/メタノール 4 mL →陰イオン性PFAS		
濃縮	画分（中性PFAS+陰イオン性PFAS）を1 mLになるまで35℃で窒素吹付け →測定用試料		
	固相抽出2	分析夾雑物除去用（ENVI-Carb, 1 mL, 100 mg）カートリッジ	
	コンディショニング	メタノール 3 mL	
	試料ロード		
	分画3	メタノール 3 mL	
	濃縮	画分3を1 mLになるまで35℃で窒素吹付け →測定用試料	
LC-MS/MS	測定用試料から100 uLを分取、バイアルにセット、5 uLを注入		
PFAS濃度	各PFAS濃度 = (各PFASの面積値) / (対応する内標準の面積値) x 添加内標準濃度		
回収率	[観測された内標準物質の濃度] / [添加した内標準の濃度] x 100		

図2 米、野菜に含まれる多成分PFASの一斉分析法の前処理工程

米、根菜類（じゃがいも、さつまいも）の処理工程を左列に、根菜類（ダイコン）・果菜類（トマト（ミニトマトを含む））・葉菜類（ほうれんそう、キャベツ）を右列に、果菜類（きゅうり、ズッキーニ）を中列に記載。中列と右列については、左列と異なる箇所のみ記載した。緑色実線の固相抽出1の工程のみでは、分析夾雑物（主に色素）が除去できない場合、緑色点線で示す固相抽出2の工程を実施する。

5）令和6年度研究結果

・農業用水の分析方法

水の分析方法については、昨年度に続き、様々な固体浮遊物やアオコのような水生

※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
- (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%
PFCA _s	6:2Cl-PFESA	9.1	0.8	9%
	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- (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

「土壤中多成分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。

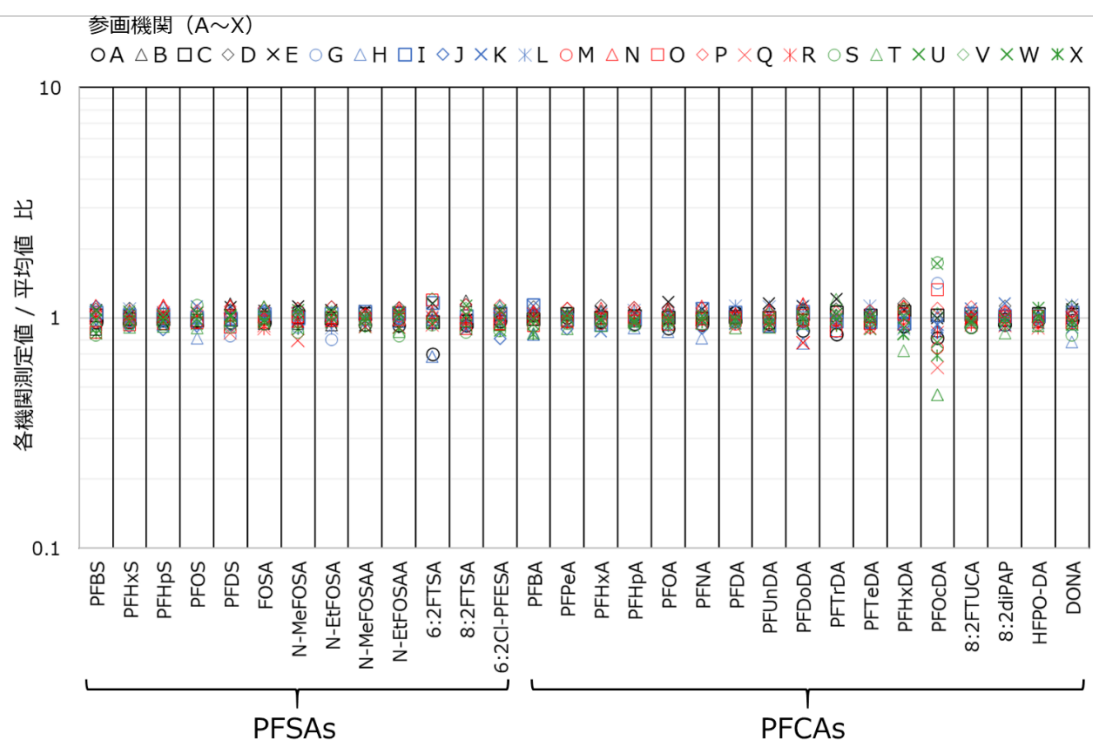


図4. 「水（不溶物あり）に含まれるPFAS分析法の室間共同試験」参画機関の各化合物の測定値/平均値（外れ値除外）

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%	
	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%	

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	M3-PFBS	23	68	12.8%	96%	15%	16%	4%	4%	
	M3-PFHxS	23	71	9.0%	99%	13%	14%	4%	5%	
	M8-PFOS	23	74	5.1%	98%	11%	11%	4%	4%	
	M8-FOSA	23	74	5.1%	88%	18%	20%	7%	10%	
	d3-N-MeFOSA	23	75	3.8%	57%	16%	29%	6%	14%	
	d5-N-EtFOSA	23	75	3.8%	52%	17%	34%	7%	16%	
	d3-N-MeFOSAA	23	76	2.6%	96%	13%	13%	5%	5%	
	d5-N-EtFOSAA	23	77	1.3%	96%	13%	13%	5%	5%	
	M2-8:2FTSA	23	71	9.0%	100%	47%	43%	8%	5%	
	M2-8:2FTSA	23	73	6.4%	99%	21%	21%	6%	6%	
	M4-PFIBA	23	77	1.3%	95%	14%	15%	4%	4%	
	M5-PFNA	23	72	7.7%	94%	14%	15%	5%	5%	
	M5-PFHxA	23	70	10.3%	95%	13%	14%	4%	5%	
	M4-PFHxA	23	71	9.0%	98%	13%	14%	5%	5%	
	M8-PFCA	23	74	5.1%	99%	14%	14%	5%	5%	
	M5-PFNA	23	75	3.8%	99%	12%	12%	5%	5%	
	M5-PFNA	23	72	7.7%	100%	14%	14%	5%	5%	
	M7-PFUnDA	23	77	1.3%	97%	11%	11%	5%	6%	
	M2-PFDoDA	23	75	3.8%	94%	14%	15%	6%	6%	
	M2-PFTeDA	23	77	1.3%	90%	17%	19%	5%	6%	
	M2-PFHxDA	23	77	1.3%	80%	24%	30%	5%	6%	
PFCA	M2-8:2FTUCA	23	77	1.3%	85%	15%	17%	6%	7%	
	M4-8:2dPAP	23	71	9.0%	94%	36%	35%	7%	7%	
PFCA	M3-HFPO-DA	22	66	12.0%	91%	11%	12%	5%	5%	

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ー（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。

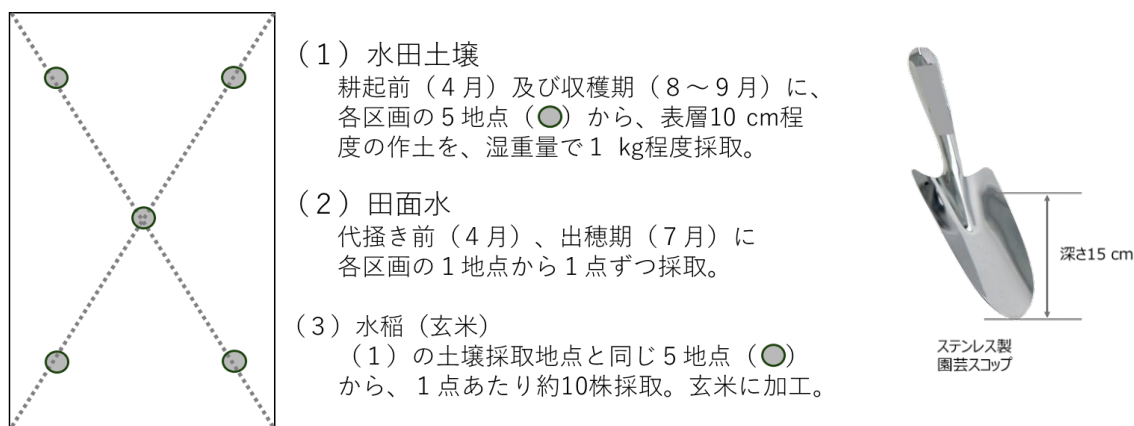


図5. 水田における土壌採取方法と器具

・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。

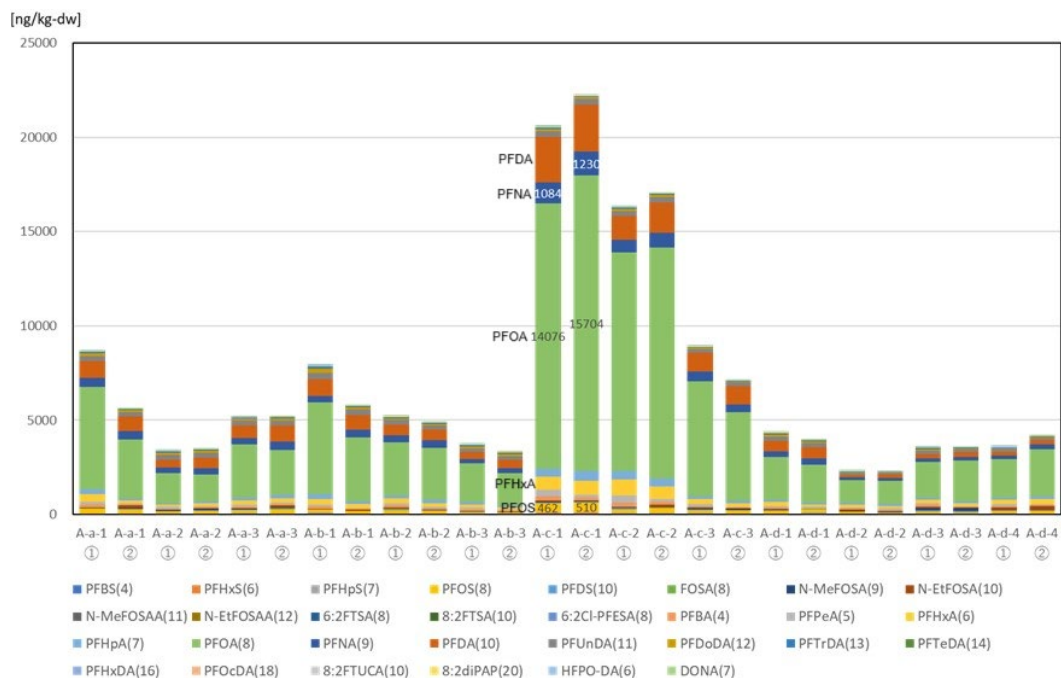


図6. 水田A地区13区画における春(①)と秋(②)の土壌中のPFAS分子種と濃度

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。

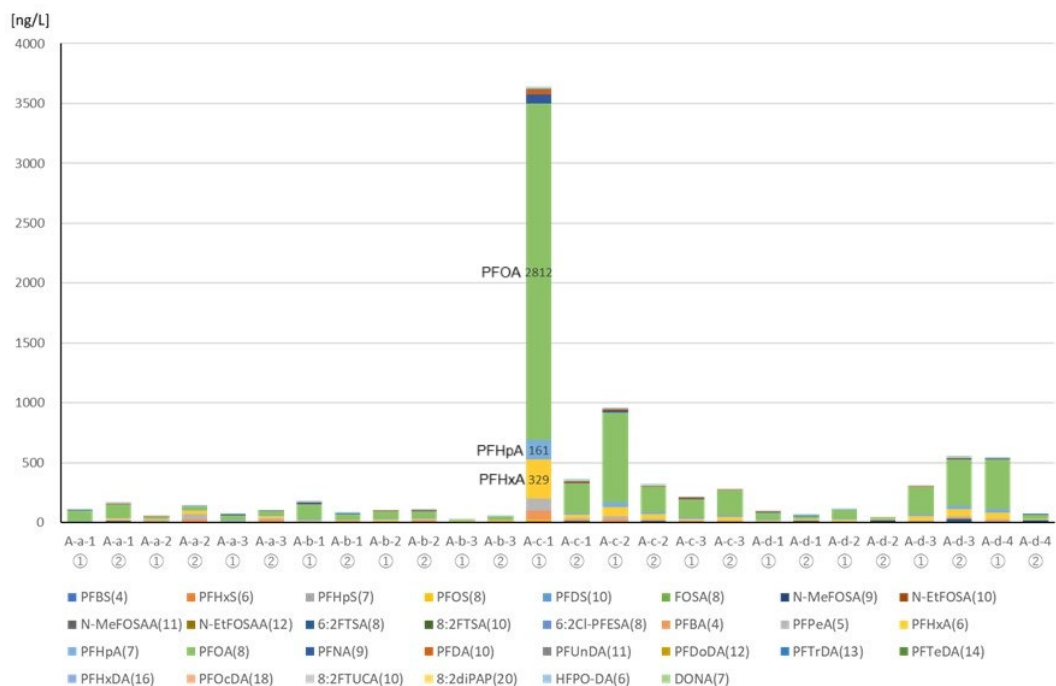


図7. 水田A地区13区画における春(①)と夏(②)の田面水中のPFAS分子種と濃度

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。

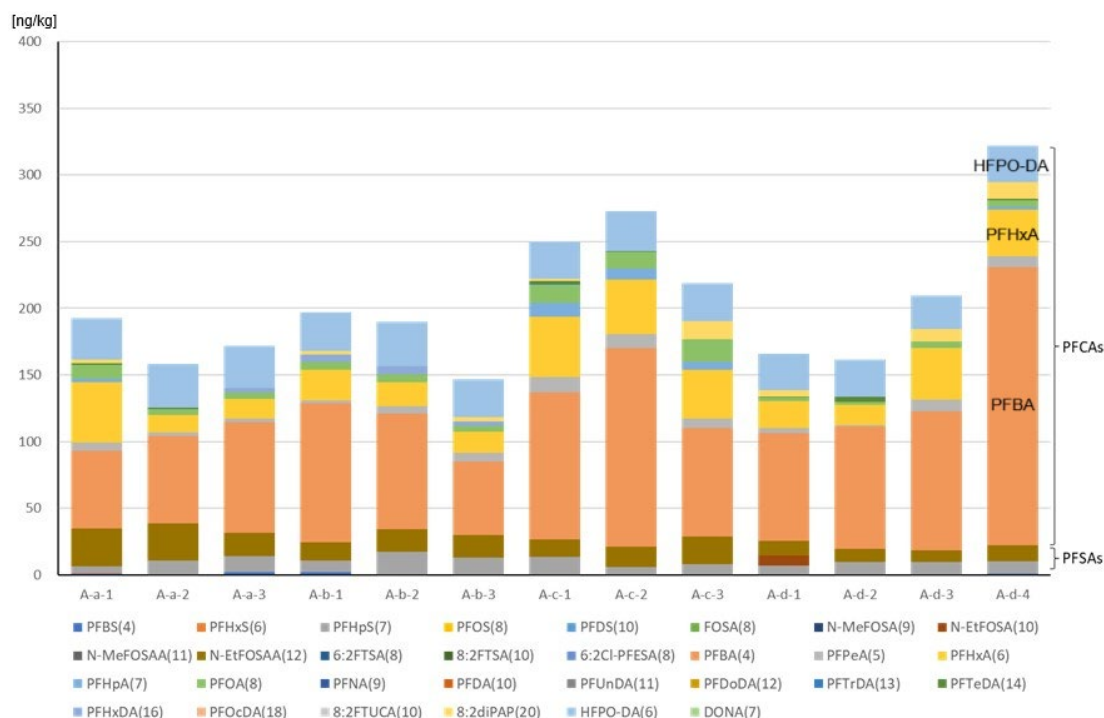


図8. 水田A地区13区画における米（玄米）中のPFAS分子種と濃度
各区画で栽培・収穫した5点の平均値を示す。

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。

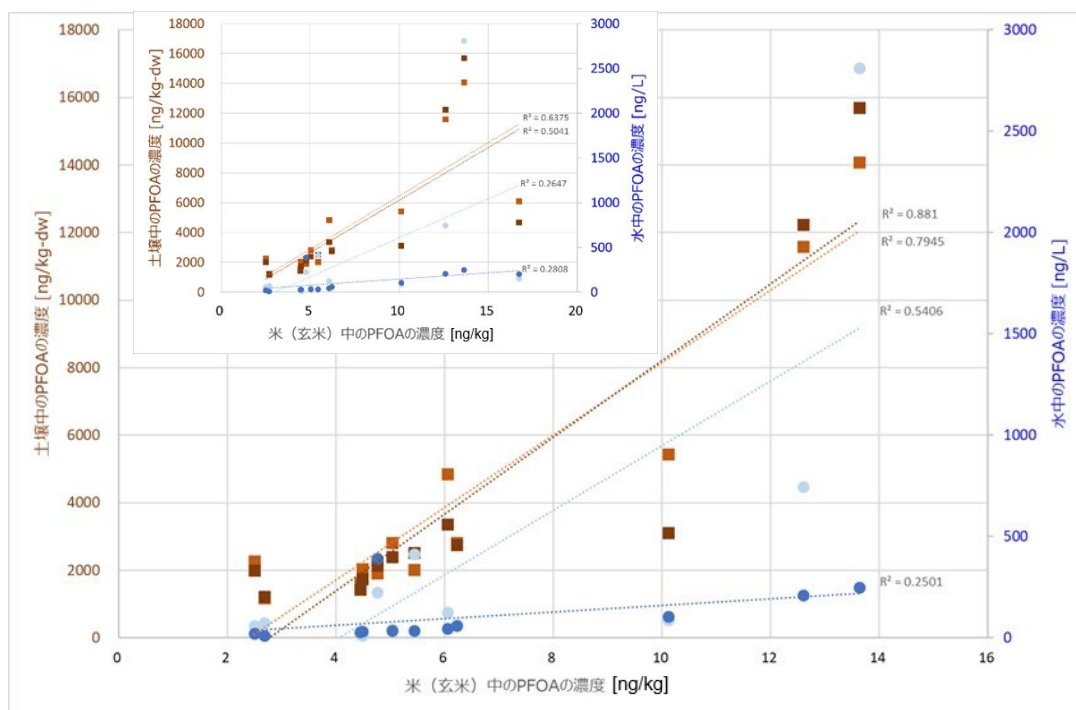


図9. 水田A地区の各区画の米（玄米）のPFOA濃度と、土壌（春■、秋■）と水（春●、夏●）に含まれるPFOA濃度との関連
最大値を示した米（玄米）のデータを除外してプロットした。挿入図は、最大値を示した米（玄米）を含め、全てのデータをプロットしたもの。

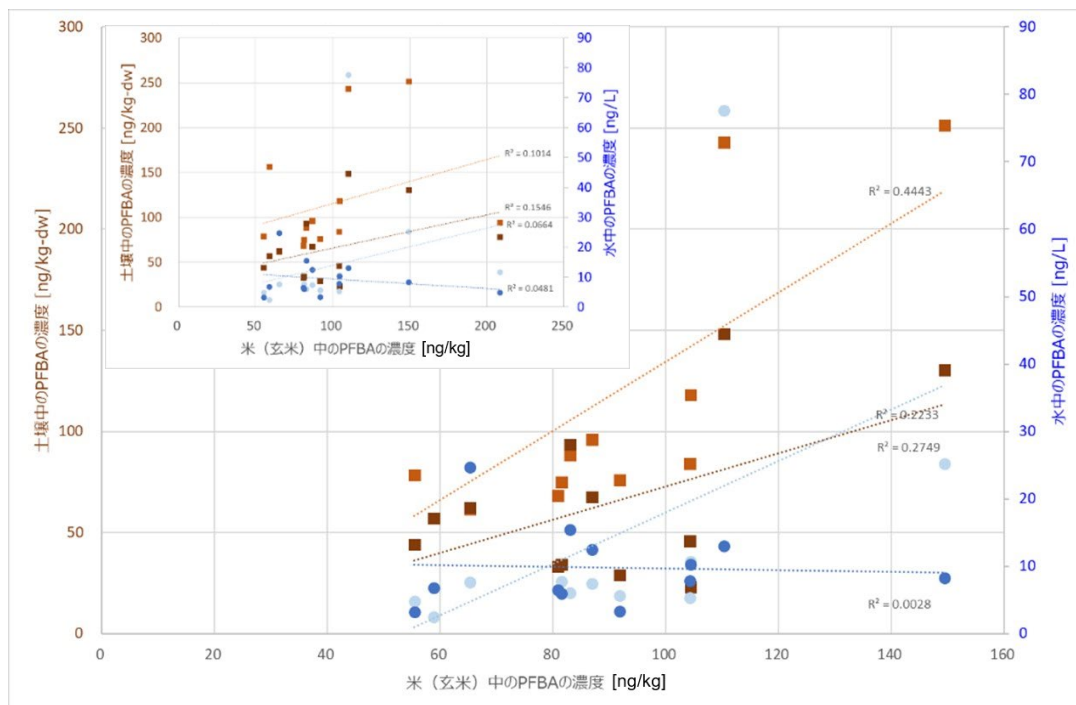


図10. 水田A地区の各区画の米（玄米）のPFBA濃度と、土壌（春■、秋■）と水（春●、夏●）に含まれるPFBA濃度との関連
最大値を示した米（玄米）のデータを除外してプロットした。挿入図は、最大値を示した米（玄米）を含め、全てのデータをプロットしたもの。

※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。

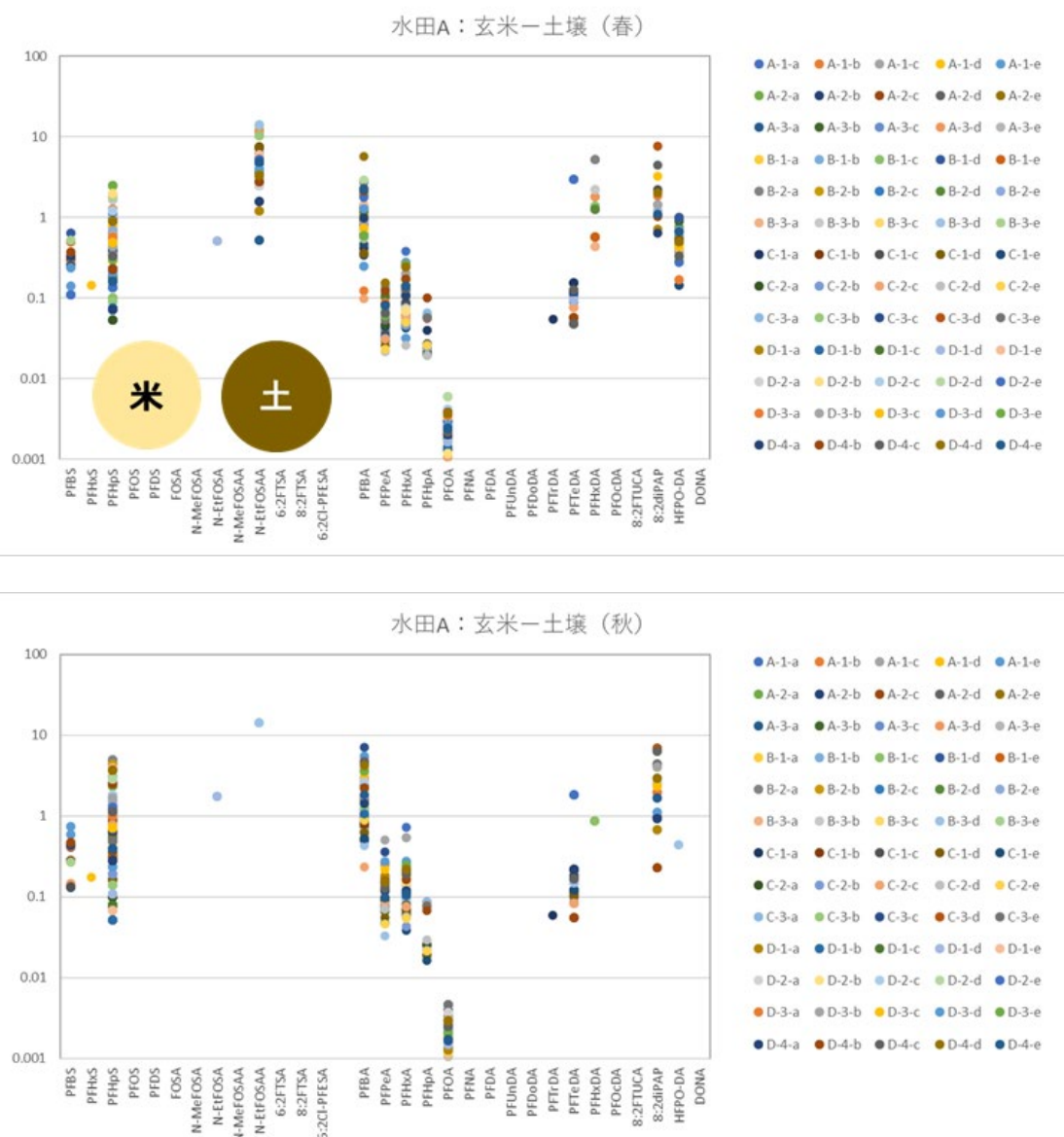


図11. 水田A地区の土壌に対する米（玄米）中のPFAS濃度の比率

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。

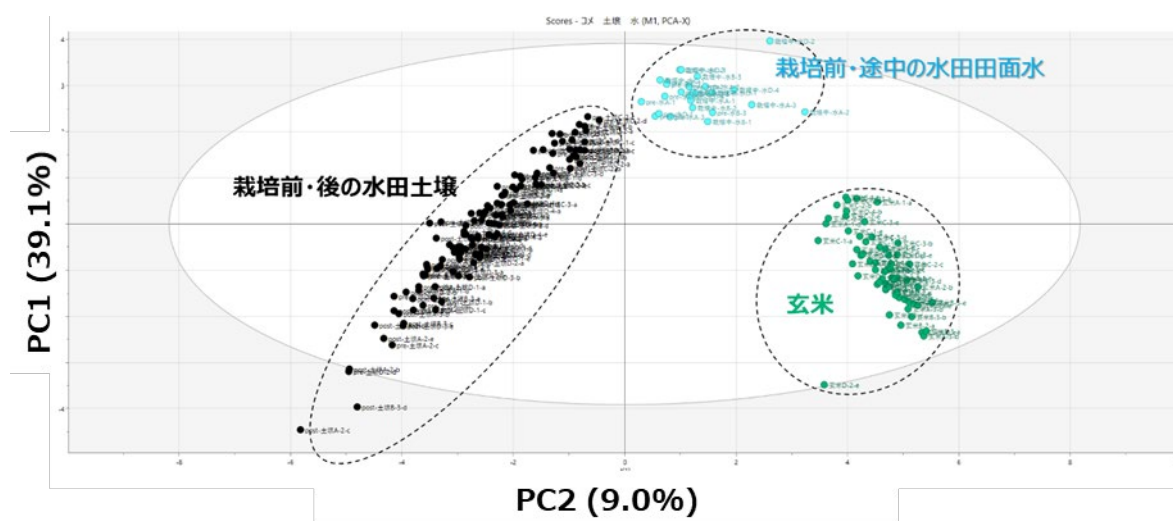


図12. 水田A地区の農地土壌、田面水及び米(玄米)の主成分分析(PCA)
第1主成分(PC1)及び第2主成分(PC2)からなる主成分得点プロット。

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 (PFSA) 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 (PFSA)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PFSA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。

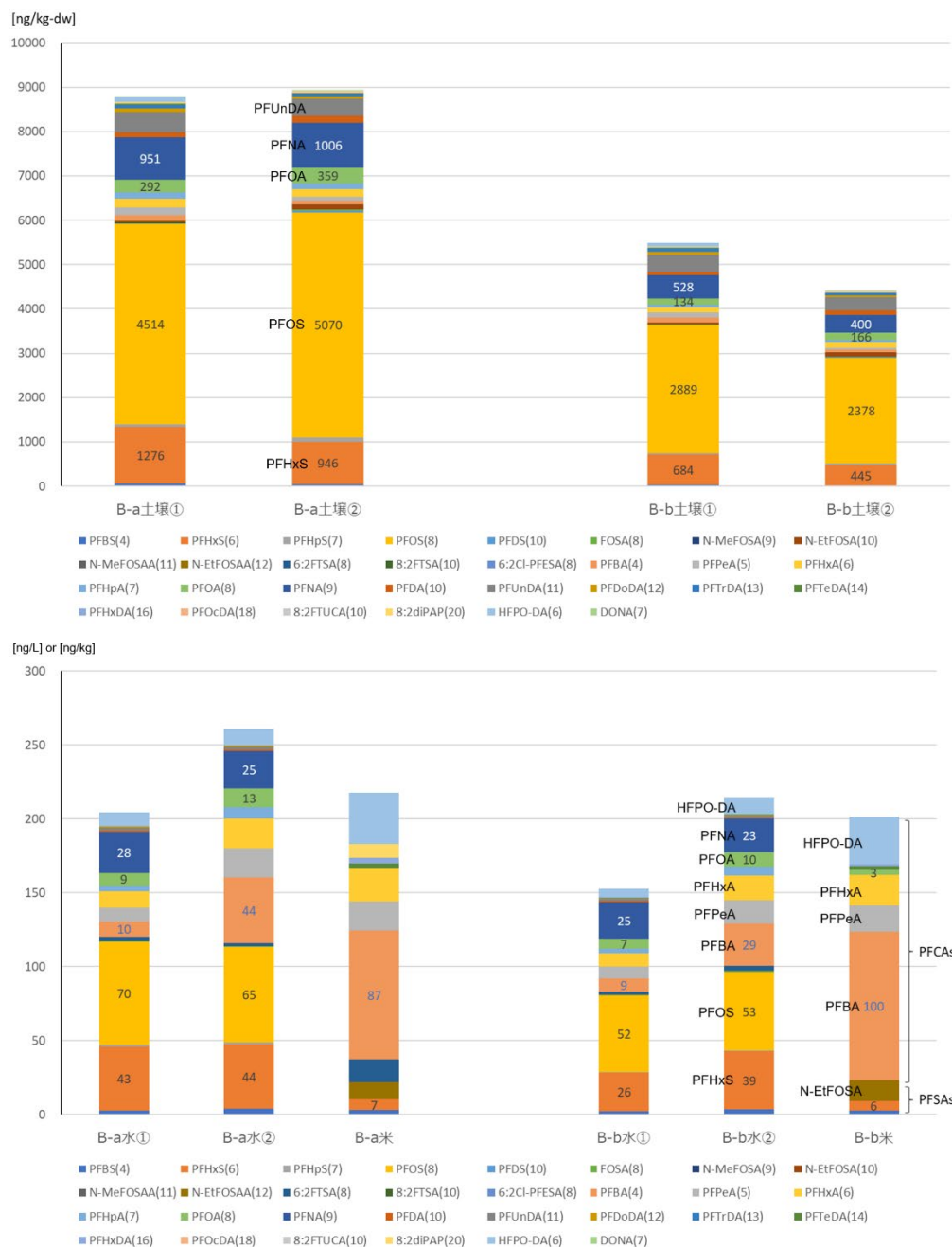


図13. 水田B地区(区画aとb)における春(①)と秋(②)の土壌(上)と水・米(下)に含まれるPFAS

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。

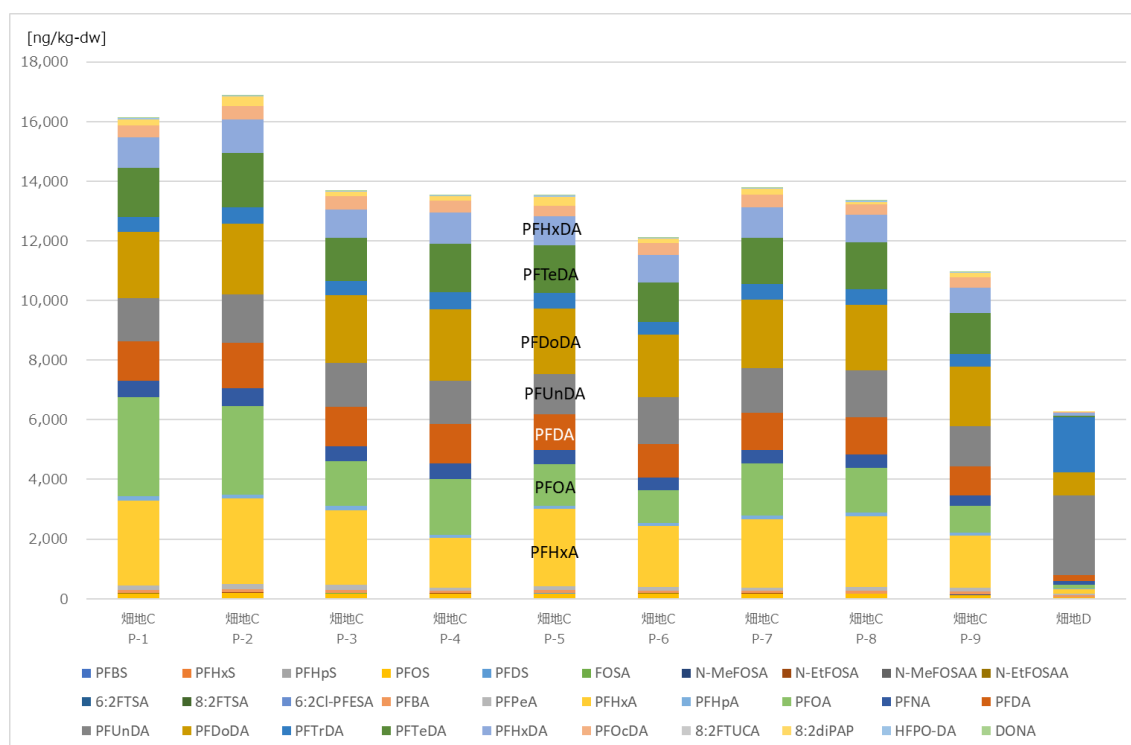


図14. 畑地C（栽培場所P1から9）及び畑地Dの農地土壌のPFAS

※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。

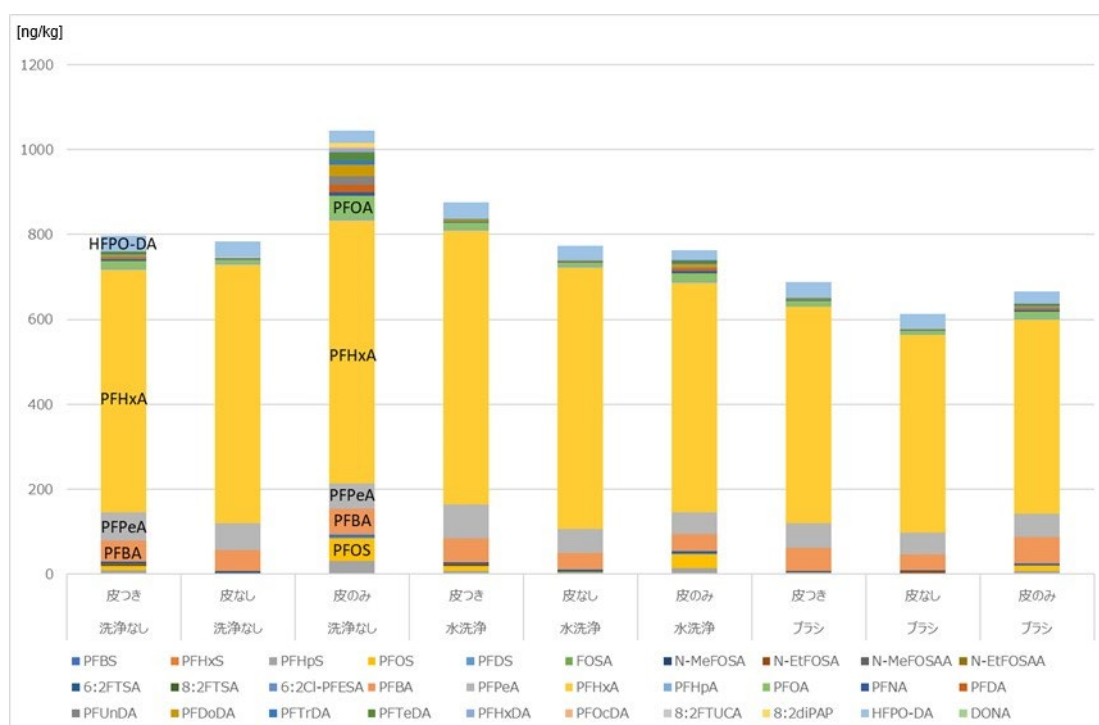


図 15. 畑地Cの栽培場所P5で栽培したじゃがいもの洗浄及び剥皮処理後の30種PFAS濃度

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。

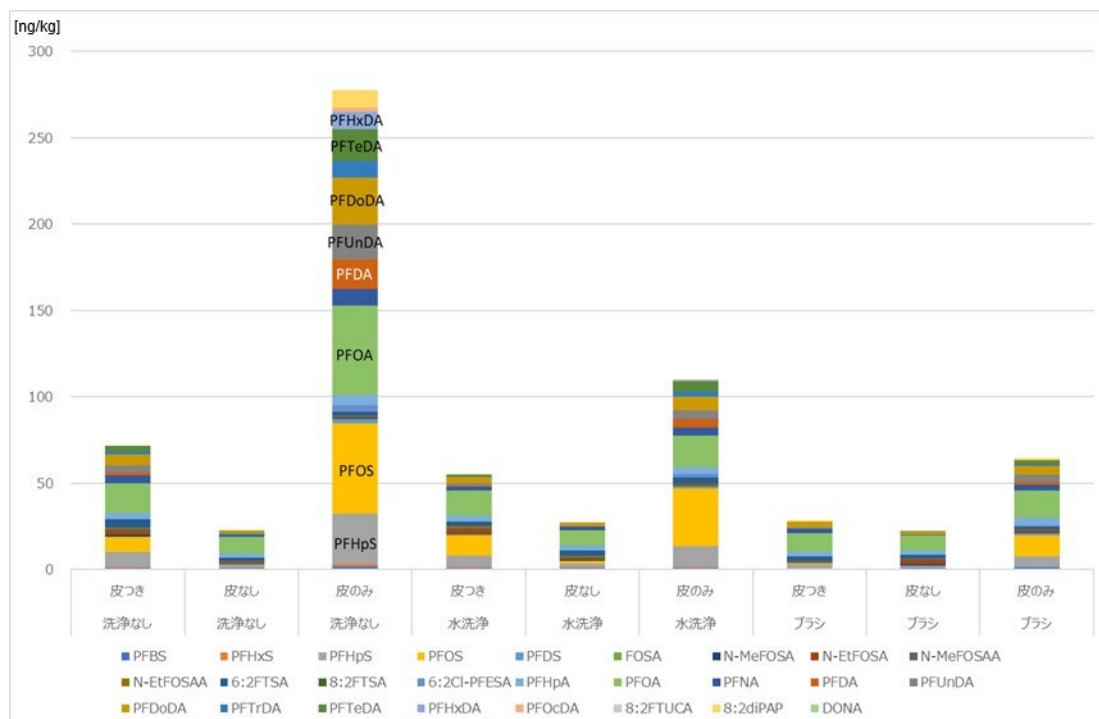


図 16. 畑地Cの栽培場所P5で栽培したじゃがいもの洗浄及び剥皮処理後の短鎖カルボン酸 (PFBA、PFPeA、PFHxA)、HFPO-DA以外のPFASの濃度

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。

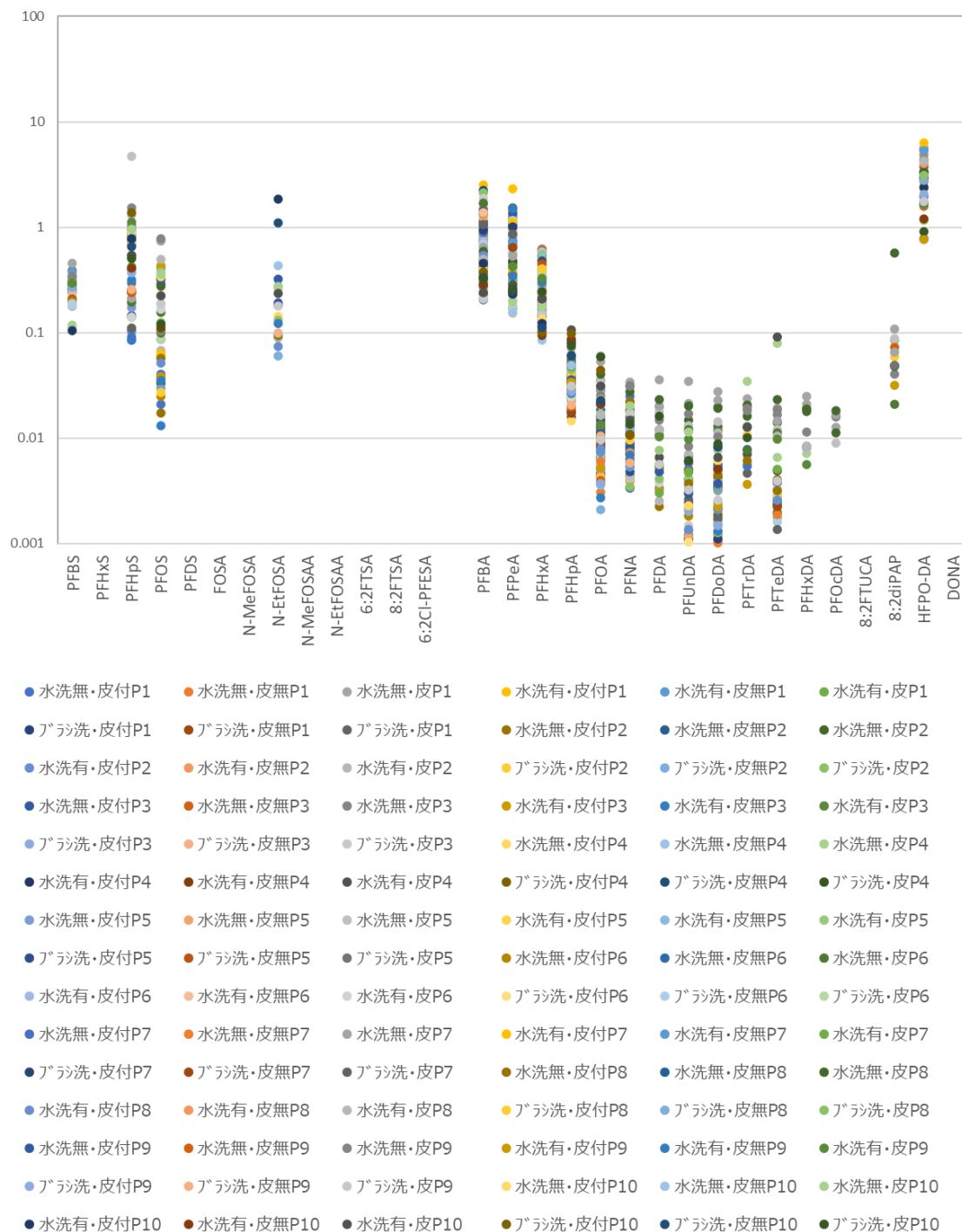


図17. 畑地C(栽培場所P1から9)及び畑地D(P10)のじゃがいもにおけるPFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

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。

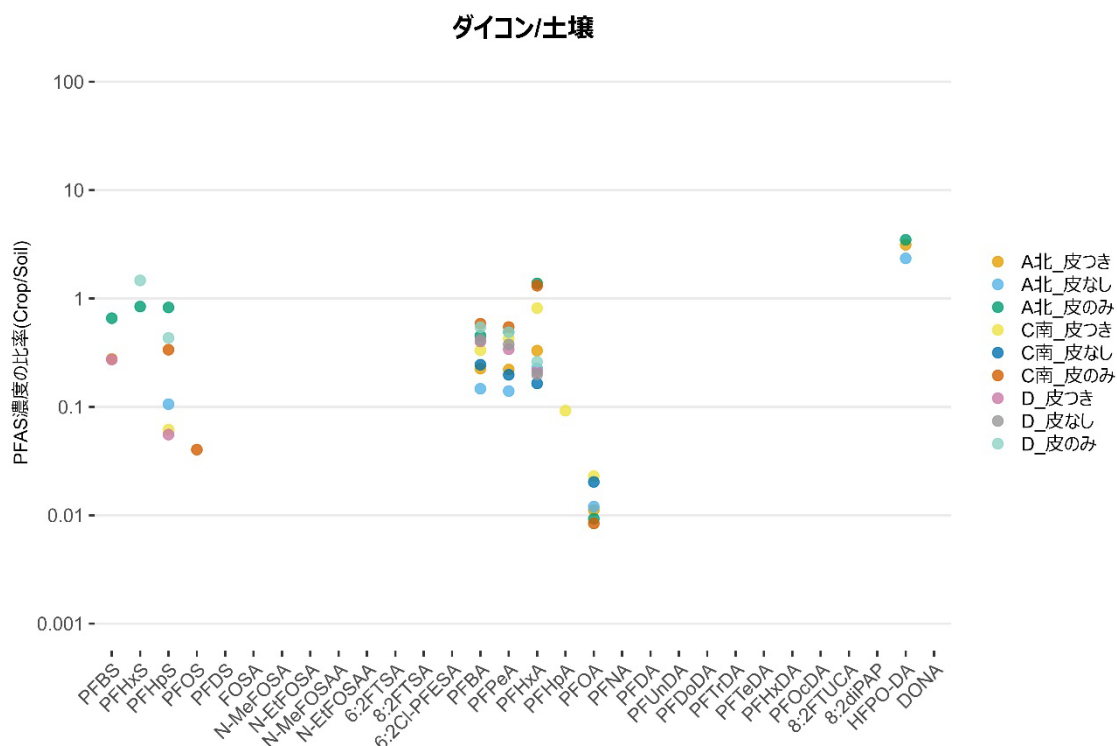


図18. 畑地C(区画AとC)と畑地D(区画D)のダイコンにおけるPFAS濃度と農地土壤中PFAS濃度の比率

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。

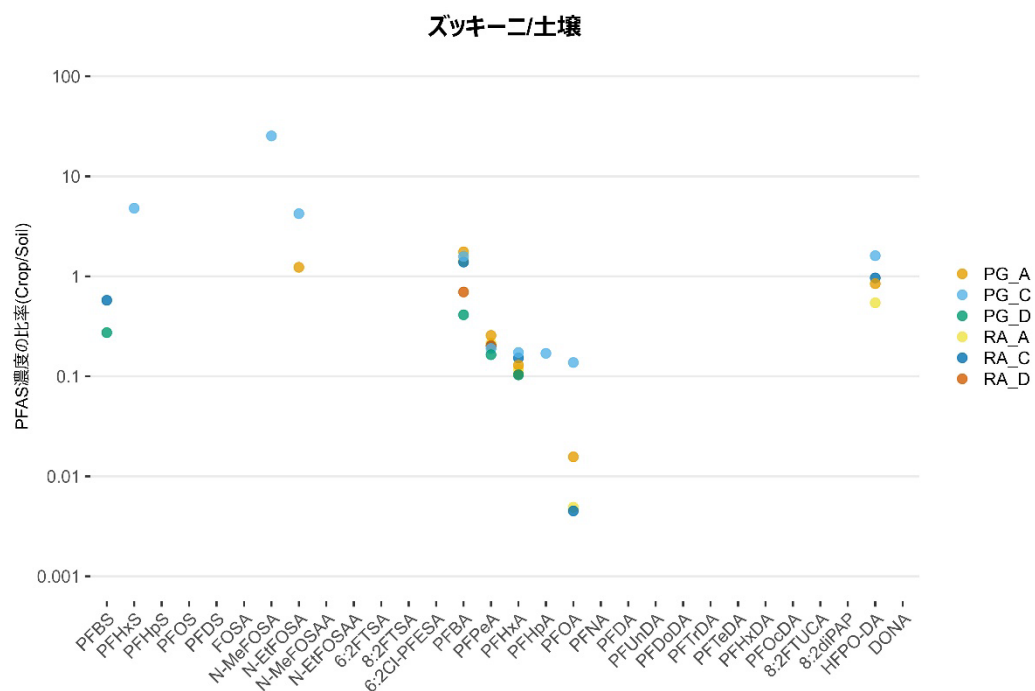


図19. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のズッキーニ中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

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。

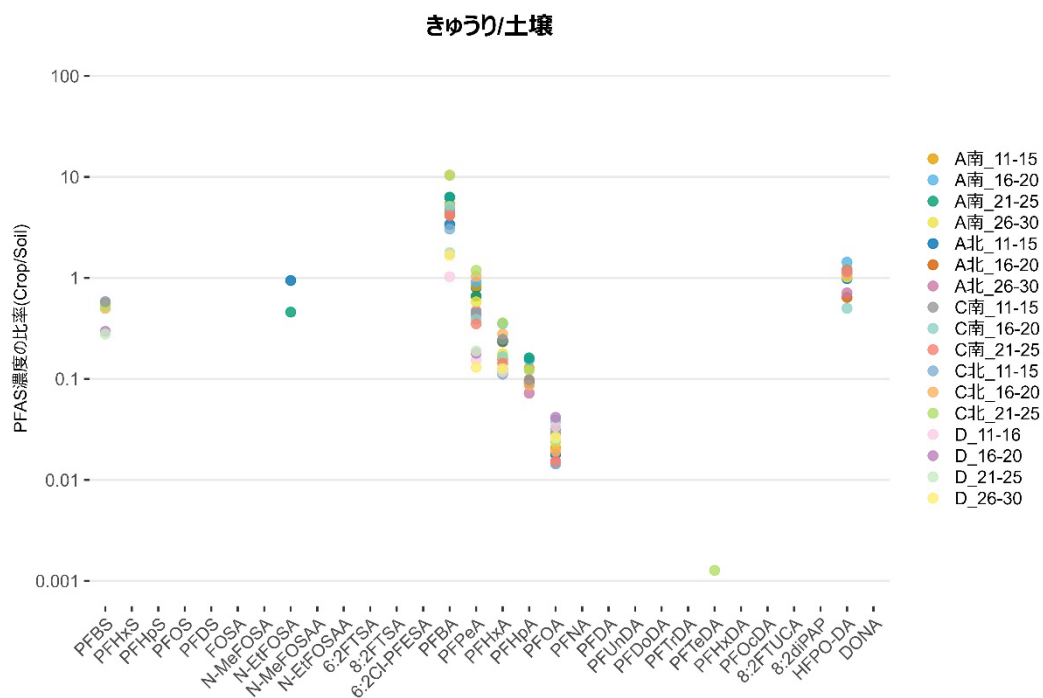


図20. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のきゅうり中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

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。

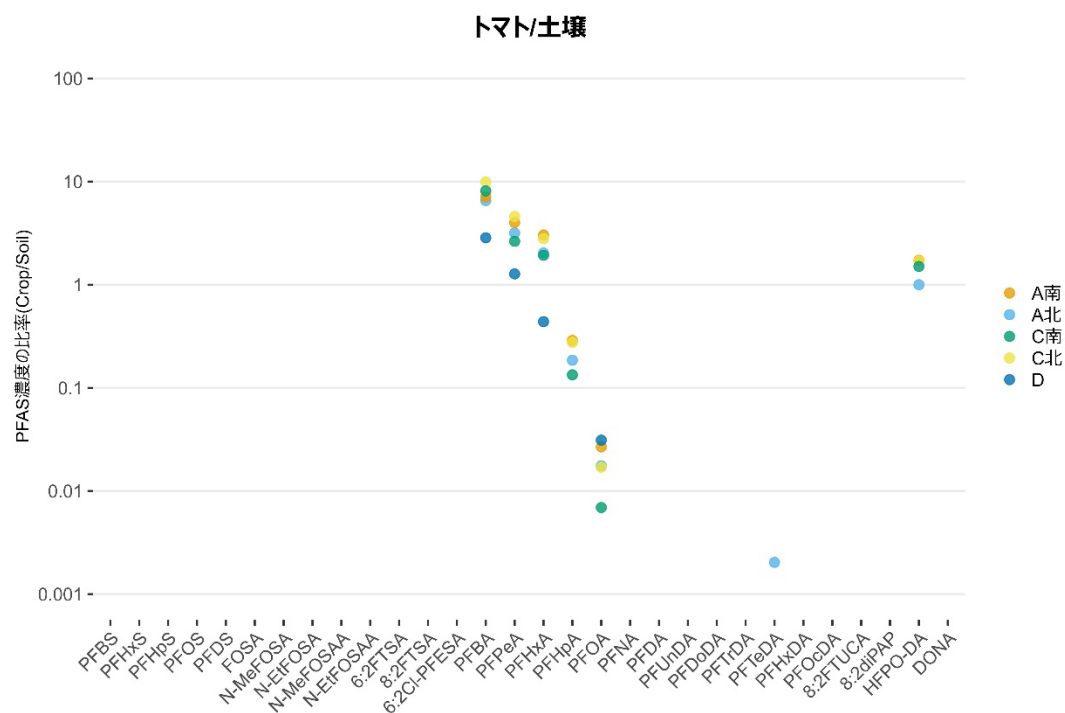


図21. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のトマト中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

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。

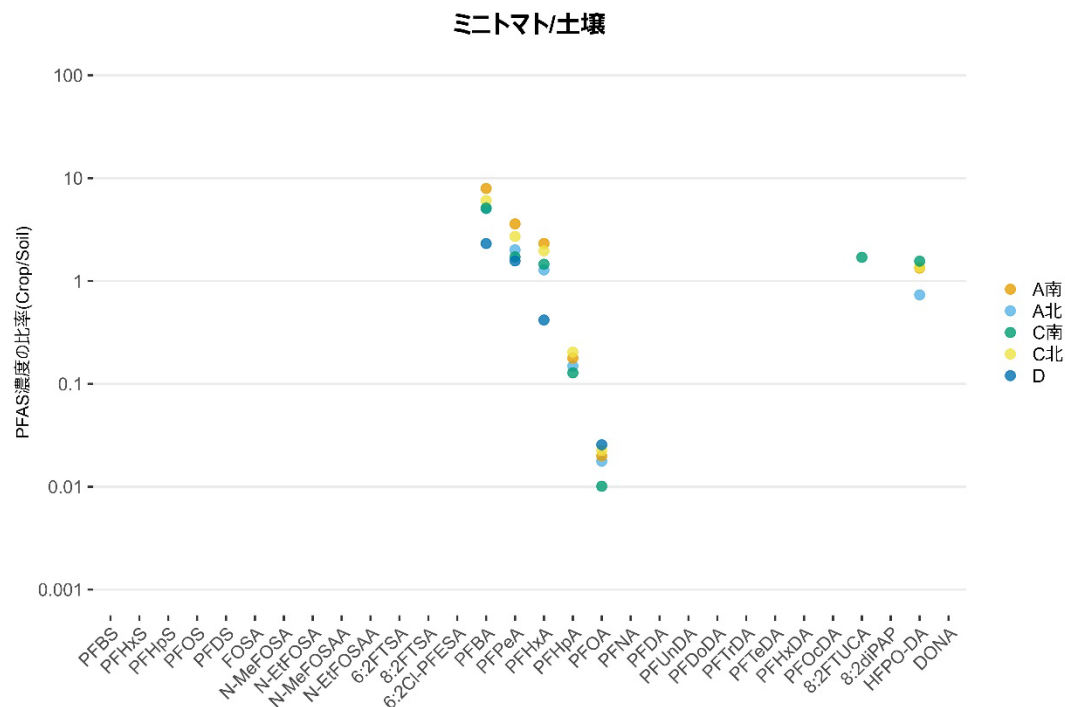


図22. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のミニトマト中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

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。

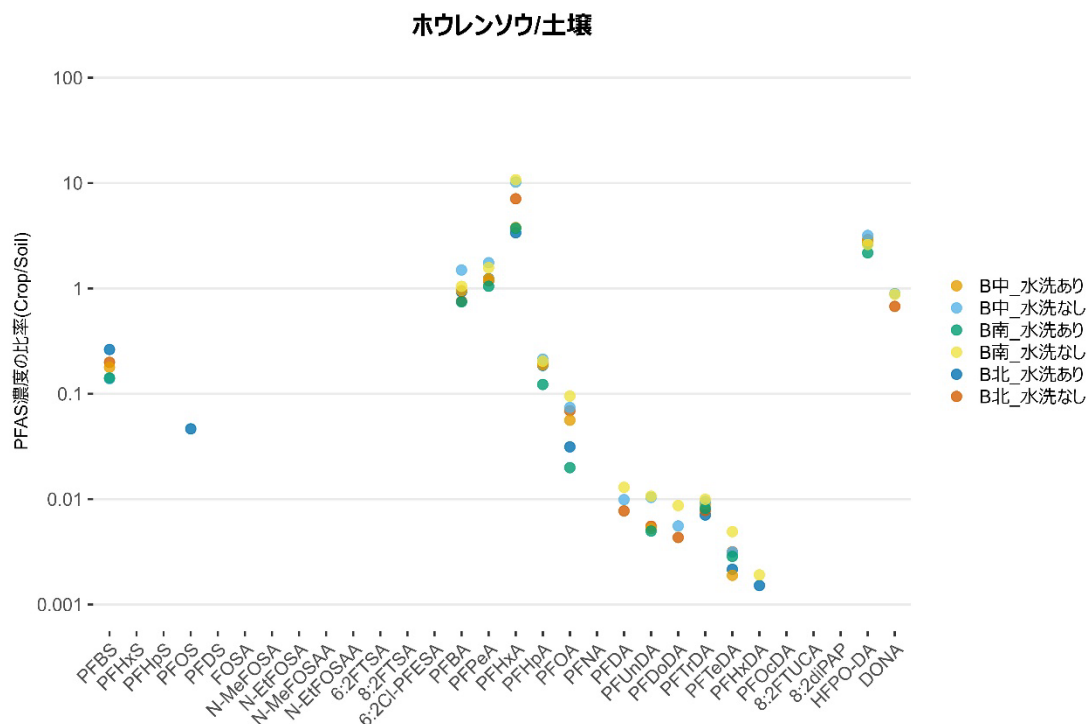


図23. 畑地C(区画B)のほうれんそう中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

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。

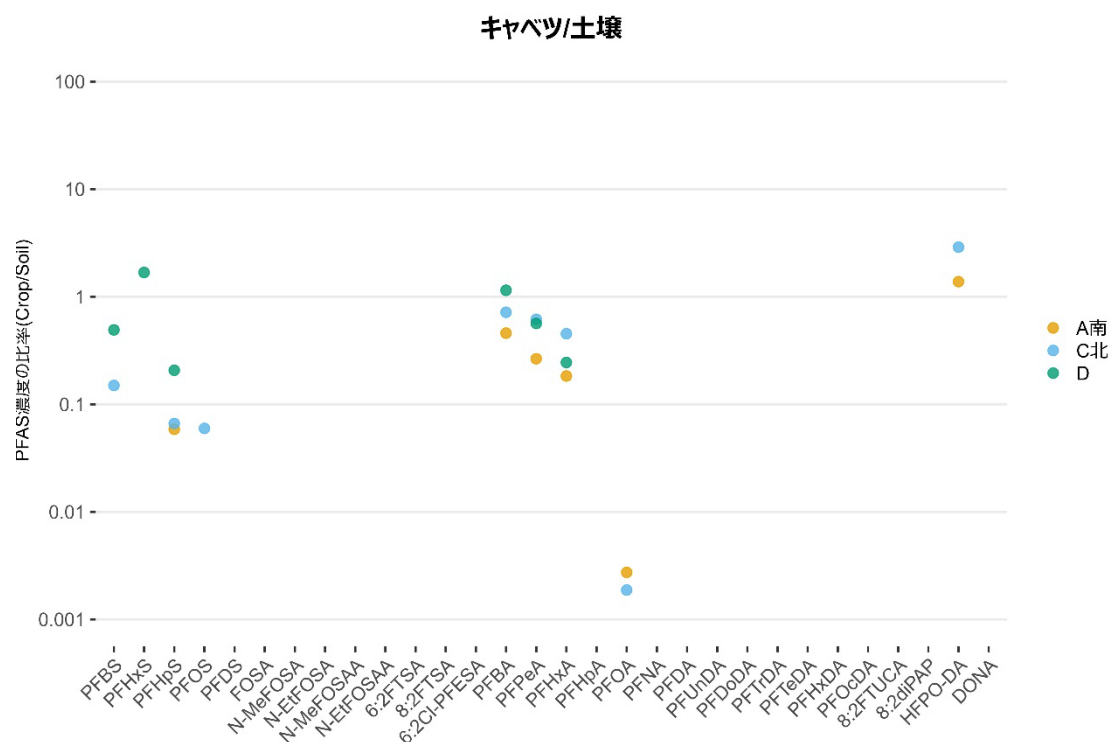


図24. 畑地C(区画AとC)及び畑地D(区画D)のキャベツ中PFAS濃度と農地土壌中PFAS濃度の比率

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。

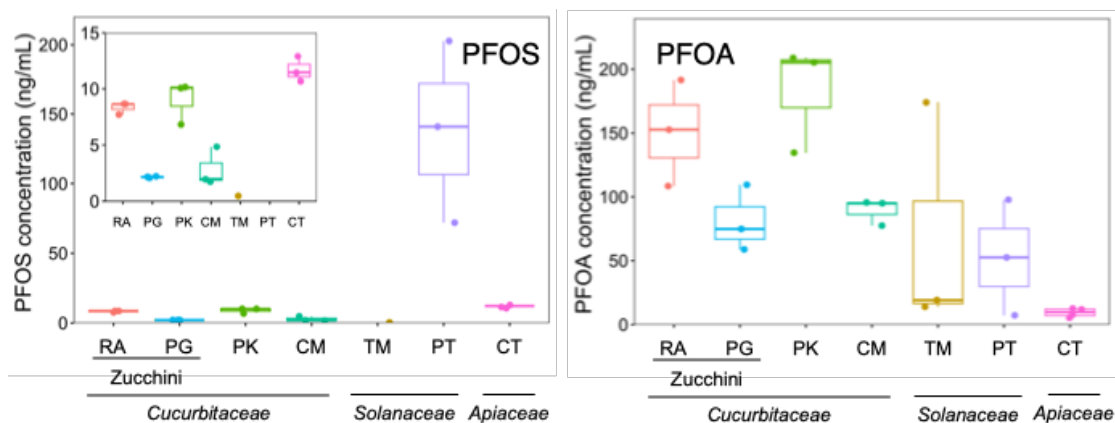


図25 PFOS及びPFOAを与えた各種作物の導管液中PFAS濃度

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。

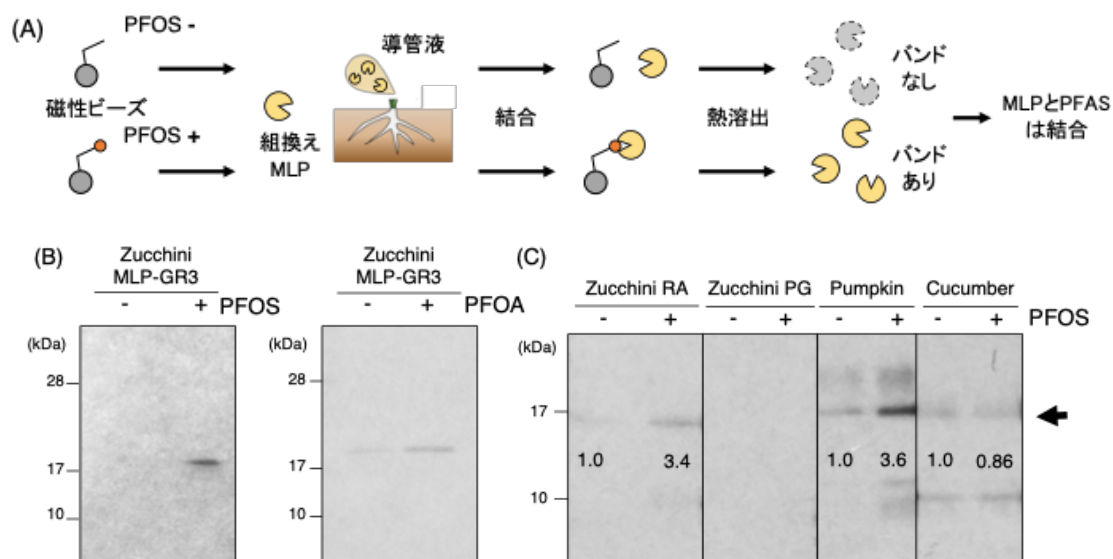


図2-6 PFOS及びPFOAとMLPの結合評価

(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-Henicosafluorodecane-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 HCIF 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	2,2,3,3,4,4,5,5,5-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-Henicosafluoroundecanoic acid	C ₁₁ HF ₂₁ O ₂	2058-94-8
Perfluoro- <i>n</i> -dodecanoic acid	PFDoDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,12-Tricosafluorododecanoic acid	C ₁₂ HF ₂₃ O ₂	307-55-1
Perfluoro- <i>n</i> -tridecanoic acid	PFTTrDA	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9,10,10,11,11,12,12,13,13,13-Pentacosafluorotridecanoic 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-Heptacosafluorotetradecanoic 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-Hentriacontafluorohexadecanoic 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-Pentatriacontafluorooctadecanoic 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