

トリプル四重極型 LC/MS/MS を用いた 有機フッ素系化合物 (PFAS) の分析

Brahm Prakash*1, Gerard Byrne*1, Tairo Ogura*1, Cindy Lee*2

*1: Shimadzu Scientific Instruments (米国)、*2: マーケティングイノベーションセンター (シンガポール)

キーワード: ペルフルオロアルキルおよびポリフルオロアルキル物質、PFAS、ペルフルオロ化合物、PFC、飲料水、PFOA、PFOS、残留性有機汚染物質、POP

■ 要旨

本アプリケーションニュースでは、島津 LC/MS/MS を用いた、EPA Method 537 で規定されているペルフルオロアルキルスルホン酸類 (Per- and polyfluoroalkyl substances、以下略: PFAS) 14 化合物、内部標準物質とサロゲート物質 6 化合物、およびその関連物質 7 化合物を含む 27 化合物の一斉分析方法を紹介し、PFAS 化合物を、飲料水より抽出・濃縮、分離して、トリプル四重極型質量分析装置である LCMS™-8045 および LCMS™-8050 で検出しました。飲料水からの回収率 86~106% (LCMS-8050) および 77~104% (LCMS-8045) は、EPA537 で規定された範囲内でした。さらに、飲料水中各 0.7~1.7 ng/L (LCMS-8050) および 0.7~3.3 ng/L (LCMS-8045) の MDL (Method Detection Limit: 分析法の検出下限値) が得られ、両装置は飲料水中の PFAS 分析について EPA の要件を満たしていました。

■ はじめに

ペルフルオロアルキルおよびポリフルオロアルキル物質 (PFAS) は、耐熱性と撥油性および撥水性のため、難燃剤、食品包装材料、および非粘着コーティングとして広く使用されている人為起源の化学物質のグループです。これらの特性としては、分解に対する強い耐性があり、PFAS は環境に蓄積します。さらに、PFAS には長距離移動性があり、また、潜在的に人間の健康に影響を及ぼす可能性があります (例: 発達および生殖への影響)。

近年、飲料水中の PFAS 汚染の問題は世界的な関心事になっています。国民の健康を保護し、これらの化学物質への人体の暴露を最小限に抑えるために、米国、EU、およびオーストラリアは、飲料水中のペルフルオロオクタン酸 (PFOA) およびペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) の健康警告ガイドラインを公表しました (例 (米国): PFOS と PFOA を

合計して 70 ng/L)。さらに、米国の一部の州 (例: カリフォルニア州、ミネソタ州、コロラド州、ミシガン州、およびニュージャージー州) では、さらに厳しい制限が設定されており、PFOS および PFOA についてはそれぞれ 13 ng/L および 14 ng/L まで低く設定されています。

米国環境保護庁 (USEPA) は、飲料水中の PFAS について Method 537 を制定しました。飲料水中の 14 種類のペルフルオロアルキル酸の測定には、固相抽出 (SPE) と液体クロマトグラフィートリプル質量分析法を使用します。これら PFAS (PFOA および PFOS) の分析に加え、環境中での利用の増加、発生、残留性により注目を集めている他の種類の化合物があります。本研究では、EPA Method 537 の一覧表に記載されている化合物とは別に、PFAS の範囲を拡大し、フッ素テロマーアルコール (PFOA の前駆体) など、7 種類の化合物を追加で含めています。

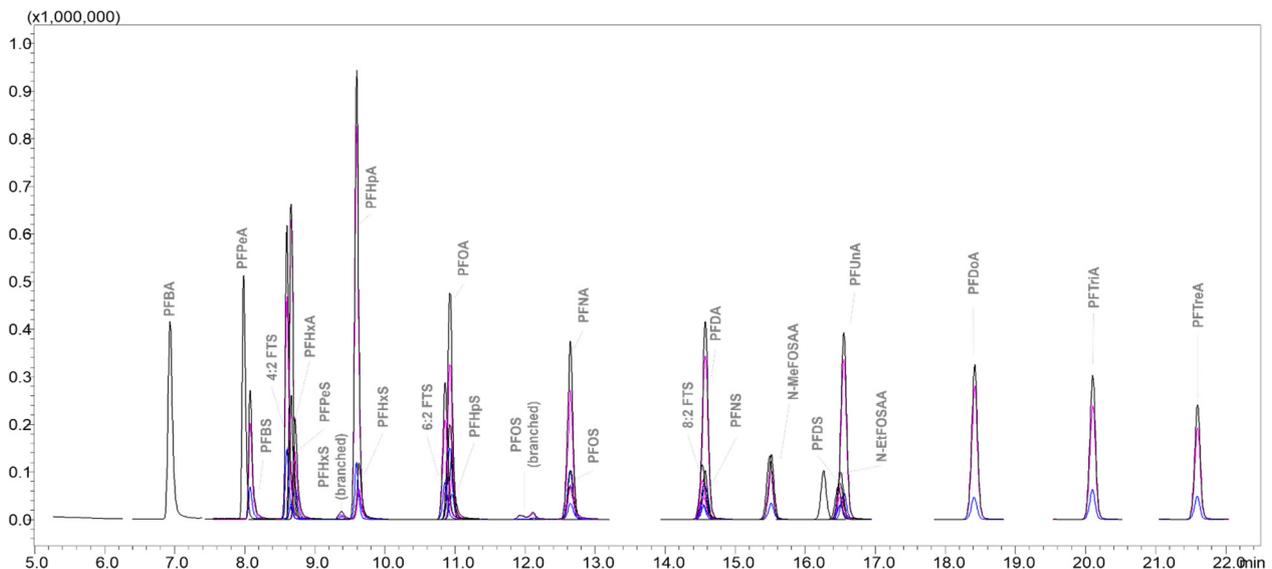


図1 20 µg/L の各 PFAS の混合標準溶液中のすべての PFAS の MRM (ピンクおよび青) および TIC (黒) クロマトグラム (LCMS-8050)

本アプリケーションニュースでは、飲料水中の 21 種類の PFAS (EPA Method 537 に記載されている 14 種類すべてを含む) の分析における島津 LC/MS/MS の利用方法と性能について説明し、実例を示します。本研究では、島津トリプル四重極型質量分析計 LCMS-8045 および LCMS-8050 を使用しました。555MRM/秒の超高速 MRM 切替速度と高速極性切替速度 (5 msec) を備えたこれらの機器は、飲料水中 PFAS 化合物の迅速で信頼性の高い高感度定量分析を実現します。

■ 実験

PFAS 化合物および検量線用標準溶液の調製

表 1 に、本研究で使用した 27 種類の PFAS 化合物 (21 種類の対象化合物、3 種類の内部標準 (IS)、および 3 種類のサロゲート) を示します。すべての PFAS 標準物質は、ウェリントンラボラトリーズ (オンタリオ州ゲエルフ) から購入しました。濃度が 1.25、2.50、5.00、10.0、15.0、20.0、25.0、37.5、50.0、および 100 µg/L の 10 種類の検量線用標準溶液は、96 : 4% (vol/vol) のメタノール : 水で希釈することにより調製しました。これらの濃度は、実試料の前処理で分析対象化合物が濃縮されることを考慮して、250 倍高い範囲に設定されています。1.25 µg/L の検量線用標準溶液が 5 ng/L の飲料水実試料濃度に相当します。

表 1 PFAS の一覧表 (対象化合物、内部標準、およびサロゲート)

PFAS Compounds	Abbreviation	CAS	Molecular Weight	Molecular Formula	IS, Surrogates and its Abbreviation	PFAS Listed in EPA Method 537
PERFLUOROALKYL CARBOXYLIC ACIDS						
Perfluorohexanoic acid	PFHxA	307-24-4	314.06	C ₆ F ₁₁ O ₂ H	M2PFHxA (Surr.) (¹³ C ₂ ¹² C ₄ F ₁₁ O ₂ H)	✓
Perfluoroheptanoic acid	PFHpA	375-85-9	364.06	C ₇ F ₁₃ O ₂ H	-	✓
Perfluorooctanoic acid	PFOA	335-67-1	414.07	C ₈ F ₁₅ O ₂ H	M2PFOA (IS) (¹³ C ₂ ¹² C ₆ F ₁₅ O ₂ H)	✓
Perfluorononanoic acid	PFNA	375-95-1	464.08	C ₉ F ₁₇ O ₂ H	-	✓
Perfluorodecanoic acid	PFDA	335-76-2	514.09	C ₁₀ F ₁₉ O ₂ H	M2PFDA (Surr.) (¹³ C ₂ ¹² C ₈ F ₁₉ O ₂ H)	✓
Perfluoroundecanoic acid	PFUnA	2058-94-8	564.09	C ₁₁ F ₂₁ O ₂ H	-	✓
Perfluorododecanoic acid	PFDoA	307-55-1	614.10	C ₁₂ F ₂₃ O ₂ H	-	✓
Perfluorotridecanoic acid	PFTriA	72629-94-8	664.11	C ₁₃ F ₂₅ O ₂ H	-	✓
Perfluorotetradecanoic acid	PFTreA	376-06-7	714.12	C ₁₄ F ₂₇ O ₂ H	-	✓
PERFLUOROALKYL SULFONATES						
Perfluorobutyl sulfonate	PFBS	375-73-5	300.10	C ₄ F ₉ SO ₃ H	-	✓
Perfluoropentane sulfonate	PFPeS	2706-91-4	350.11	C ₅ F ₁₁ SO ₃ H	-	Additional
Perfluorohexyl sulfonate	PFHxS	355-46-4	400.11	C ₆ F ₁₃ SO ₃ H	-	✓
Perfluoroheptane sulfonate	PFHpS	375-92-8	450.12	C ₇ F ₁₅ SO ₃ H	-	Additional
Perfluorooctane sulfonate	PFOS	1763-23-1	500.13	C ₈ F ₁₇ SO ₃ H	M4PFOS (IS) (¹³ C ₄ ¹² C ₄ F ₁₇ SO ₃ Na)	✓
Perfluorononane sulfonate	PFNS	68259-12-1	550.14	C ₉ F ₁₉ SO ₃ H	-	Additional
Perfluorodecane sulfonate	PFDS	335-77-3	600.14	C ₁₀ F ₂₁ SO ₃ H	-	Additional
FLUORINATED TELOMER SULFONATES						
1H, 1H, 2H, 2H-perfluorohexane sulfonic acid	4:2 FTS	757124-72-4	328.15	C ₆ H ₅ F ₉ SO ₃	-	Additional
1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctane sulfonic acid	6:2 FTS	27619-97-2	428.17	C ₈ H ₅ F ₁₃ SO ₃	-	Additional
1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecane sulfonic acid	8:2 FTS	39108-34-4	528.18	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ SO ₃	-	Additional
PERFLUOROCTANESULFONAMIDE AND PERFLUOROCTANESULFONAMIDOACETIC ACIDS						
2-(N-Methylperfluorooctanesulfonamido) acetic acid	N-MeFOSAA	2355-31-9	571.21	C ₁₁ H ₆ F ₁₇ NSO ₄	d3-NMeFOSAA (IS) (C ₁₁ H ₂ H ₃ F ₁₇ NSO ₄)	✓
2-(N-Ethylperfluorooctanesulfonamido) acetic acid	N-EtFOSAA	2991-50-6	585.24	C ₁₂ H ₈ F ₁₇ NSO ₄	d5-NEtFOSAA (Surr.) (C ₁₂ H ₃ H ₃ F ₁₇ NSO ₄)	✓

試料の調製

EPA Method 537 に従って、試料の調製と固相抽出 (SPE) を行いました。PFAS 汚染の可能性を減らすため、PEEK チューブを取り付けた大量サンプリングキットを備えた真空マニホールドを使用しました。抽出は、Biotage-ISOLUTE®101 ポリスチレンジビニルベンゼン (SDVB) カートリッジ (500 mg/6 mL、部品番号 101-0050-C) を使用して行いました。各 SPE カートリッジは、最初にメタノールを通液し、次に LCMS グレードの超純水を通液してコンディショニングしました。分析対象化合物を 8 mL のメタノールで固相より溶出し、そのメタノール溶液を窒素で蒸発乾固しました。固相抽出した試料は、IS を加えた後、96 : 4%メタノール : 水

で最終体積が 1 mL になるように再溶解しました。すべての溶液が均質化され、一貫性のある結果が得られるよう、LC/MS/MS による分析の前に LC バイアルをボルテックス攪拌することを推奨します。

LC/MS/MS 分析および機器条件

PFAS 分析は、表 2 および表 3 に示す条件で抽出した溶液 1 µL を LCMS-8045 および LCMS-8050 に注入することにより実施しました。PFHxA および PFOS の分岐および直鎖異性体を含む PFAS 化合物は、Shim-pack Velox™ SP-C18 カラムを使用して分離しました。

表 2 LC システムとパラメータ

LC System	: Nexera™-X2 UHPLC System
Analytical Column	: Shim-pack Velox SP-C18, 150 mm × 2.1 mm × 2.7 µm, Part No. 227-32003-04
Solvent Delay Column	: Shim-pack™ XR-ODS II, 75 mm × 2 mm × 2.2 µm, Part No. 228-41605-93
Column Temp.	: 40 °C
Injection Volume	: 1 µL*
Mobile Phase	: A: 20 mM Ammonium Acetate B: Methanol
Flow Rate	: 0.25 mL/min
Run Time	: 35 minutes

* EPA Method 537 の注入量 (10 µL) と比較して、はるかに少ない注入量 (1 µL) を使用しました。

表 3 LC/MS パラメータ

MS Instrument	: LCMS-8045 and LCMS-8050
Interface	: Electrospray Ionization (ESI)
Interface Temp.	: 300 °C
Desolvation Line Temp.	: 100 °C
Heat Block Temp.	: 200 °C
Heating Gas Flow	: 15 L/min
Drying Gas Flow	: 5 L/min
Nebulizing Gas Flow	: 3 L/min
Total MRMs	: 48

表 4 保持時間 (RT) および MRM トランジション

PFAS Compound	RT (mins)	Precursor Ion	Product Ion
PFBS	8.046	298.90	80.10* 99.10
4:2 FTS	8.558	327.00	80.90* 307.00
PFHxA	8.614	312.90	269.00* 119.10
M2PFHxA (Surr.)	8.650	315.00	270.00*
PFPeS	8.666	348.90	79.90* 98.90
PFHpA	9.512	362.90	319.00* 169.00
PFHxS	9.558	398.90	80.10* 99.10
6:2 FTS	10.770	427.00	406.90* 80.00
PFOA	10.840	412.90	369.00* 169.00
PFHpS	10.859	448.90	79.90* 98.90
M2PFOA (IS)	10.877	415.00	370.00*
PFNA	12.545	462.90	418.90* 219.00
PFOS	12.550	498.90	80.10* 99.10
M4PFOS (IS)	12.575	503.00	80.00*
8:2 FTS	14.436	526.90	506.90* 80.90
PFNS	14.469	548.90	79.90* 98.90
M2PFDA (Surr.)	14.484	515.00	469.95*
PFDA	14.486	512.90	468.90* 219.00
M-N-MeFOSAA (IS)	15.403	572.90	419.00*
N-MeFOSAA	15.423	569.90	419.00* 482.90
M-N-EtFOSAA (Surr.)	16.357	588.90	419.00*
PFDS	16.397	598.90	79.90* 98.90
N-EtFOSAA	16.411	583.90	419.00* 482.90
PFUnA	16.449	562.90	519.00* 269.00
PFDoA	18.339	612.90	568.90* 169.00
PFTriA	20.035	662.00	618.90* 169.00
PFTreA	21.549	712.90	668.90* 169.00

PFAS はチューブや HPLC システムなど、実験室の装置に広く存在するため、LCMS グレードの試薬溶媒を使用した場合でも、LC 移動相から PFAS を完全に除去することは不可能です。このため、高感度分析には溶媒由来化合物遅延カラムを使用する必要があります。分析カラムよりも PFAS の保持率が高い小さな C18 カラムをオートサンプラーのすぐ上流に配置して、移動相に含まれるすべての PFAS を捕捉します。クロマトグラフ溶離中、分析カラムに試料由来の PFAS ピークが最初に現れ、遅延カラムに捕捉された移動相の汚染に由来する二次ピークと分離されます。

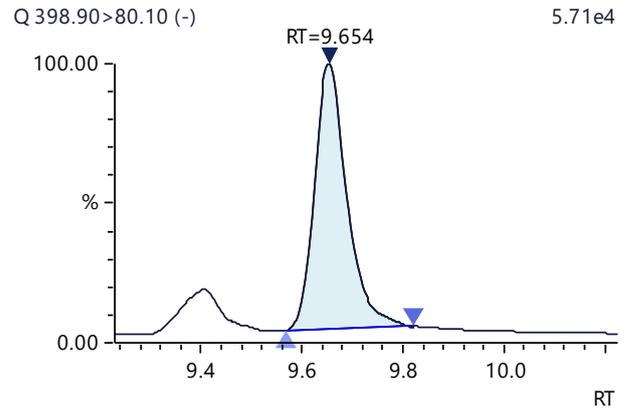


図2 PFHxS 異性体の分離 (20 µg/L)

■ 結果と考察

クロマトグラフィーによる分離

各対象 PFAS に対して 2 つの MRM トランジション (定量化用と確認用) を選択しました (表 4)。図 1 に、代表的な分離プロファイルを示すために LCMS-8050 を使用して得られた、混合標準溶液 (20 µg/L) 中のすべての PFAS の MRM およびトータルイオンカレント (TIC) のクロマトグラムを重ねて示しています。

PFHxS (図 2) および PFOS (図 3 および図 4) の分岐および直鎖異性体は、Shim-pack Velox SP-C18 カラムを使用してクロマトグラフィーで分離されています。

検量線の直線性と定期校正検査

分析対象 PFAS 化合物の検量線用標準溶液を調製し、10 点検量線を作成するために各 1 回の注入で分析しました。すべての検量線 (表 5) の決定係数 (R²) は 0.99 よりも高く、これらの検量線を使用して PFAS の定量を行いました。また低濃度 (20 µg/L)、中濃度 (50 µg/L)、高濃度 (100 µg/L) で、2 週間の調査中に 4 回反復注入することにより、定期校正検査 (CCC) を実施しました。3 つの濃度レベルでのすべての PFAS 化合物の回収率は、十分に EPA の CCC 基準 (真値の 70~130%) の範囲内でした。データは、LCMS-8045 と LCMS-8050 のいずれもが EPA Method 537 で要求される濃度範囲に確実に対応できることを示しており、図 3 および図 4 に示すように良好な SN 比でピークが検出されました。

表 5 LCMS-8045 を使用して測定した検量線の直線性 (1.25~100 µg/L および CCC の %RSD (n = 4))

Compound	Linearity (R ²)	Low Concentration (20 µg/L)		Mid Concentration (50 µg/L)		High Concentration (100 µg/L)	
		Conc.	%RSD	Conc.	%RSD	Conc.	%RSD
PFBS	0.9977	21	2	46	3	103	2
4:2FTS*	0.9928	22	2	45	7	94	1
PFHxA	0.9968	21	4	48	6	102	3
PFPeS*	0.9985	21	2	46	2	100	1
PFHpA	0.9974	21	5	46	5	101	2
PFHxS	0.9968	21	3	46	5	104	3
6:2 FTS*	0.9968	21	4	44	4	95	2
PFOA	0.9967	21	5	47	7	103	3
PFHpS*	0.9982	21	4	45	8	104	6
PFOS	0.9986	20	6	44	7	103	12
PFNA	0.9975	21	10	47	2	100	3
8:2 FTS*	0.9940	23	14	46	13	94	13
PFNS*	0.9978	21	2	46	6	100	5
PFDA	0.9969	21	3	47	3	98	2
N-MeFOSAA	0.9979	21	3	47	1	100	3
N-EtFOSAA	0.9980	22	4	48	2	102	5
PFDS*	0.9970	21	4	45	11	103	5
PFUnA	0.9973	21	4	48	4	100	6
PFDaA	0.9975	21	4	48	3	103	6
PFTriA	0.9967	20	5	45	5	101	5
PFTreA	0.9966	21	5	47	4	103	3

* EPA Method 537 に記載されていない追加の PFAS 化合物

LCMS-8045

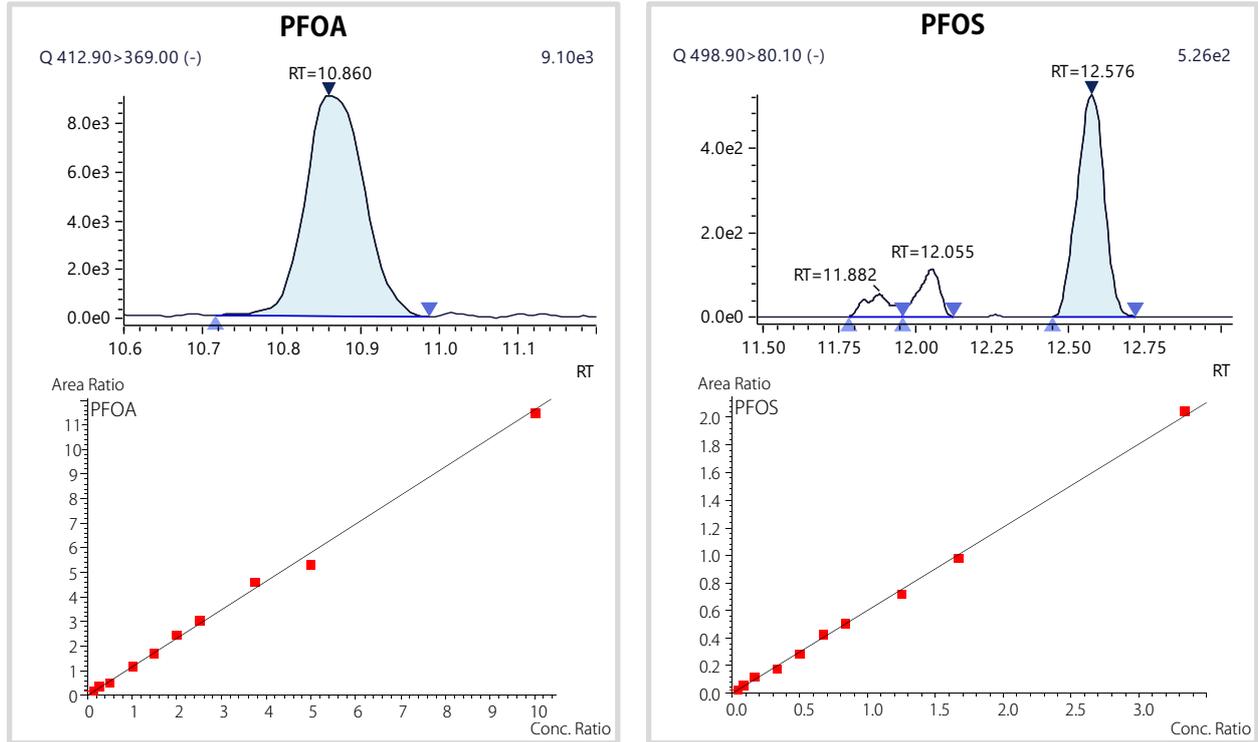


図3 LCMS-8045を使用して測定したPFOAおよびPFOSのMRMクロマトグラム（1.25 µg/Lの場合）および検量線

LCMS-8050

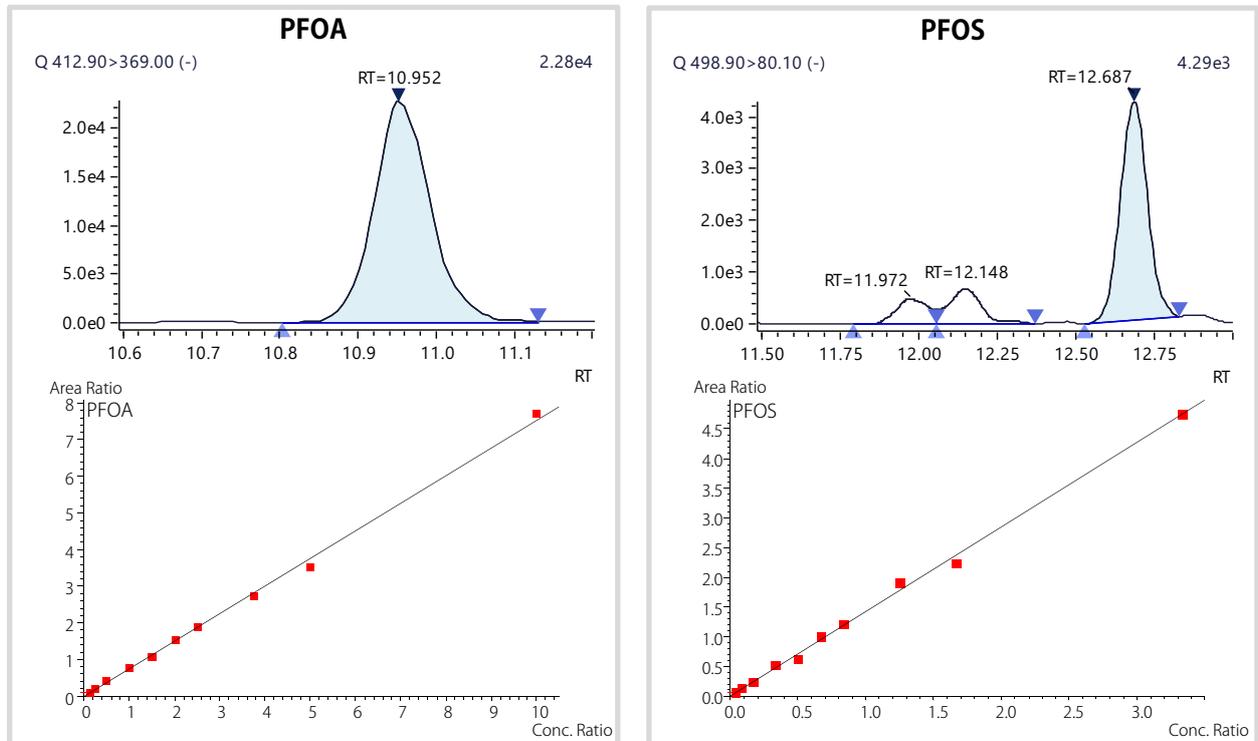


図4 LCMS-8050を使用して測定したPFOAおよびPFOSのMRMクロマトグラム（1.25 µg/Lの場合）および検量線

分析法の検出限界 (MDL)

MDL 試験は、250 mL の水実試料に各 PFAS を濃度 5 ng/L に添加することで実施されました。次いで、これらの試料を前処理し、96 : 4%メタノール : 水で最終体積 1 mL に濃縮し

ました。このような試料を 9 種類、3 日間にわたって前処理しました。LCMS-8045 および LCMS-8050 を使用した試験結果は表 6 にまとめられているように、それぞれ 0.7~3.3 ng/L および 0.7~1.6 ng/L の MDL が達成されています。

表 6 LCMS-8045 および LCMS-8050 を使用して測定した MDL の検討結果

Compound	Spiked Conc. (ng/L)	LCMS-8045				LCMS-8050			
		Calculated Conc. (ng/L), n = 9	% Recovery	% RSD	MDL (ng/L)	Calculated Conc. (ng/L), n = 9	% Recovery	%RSD	MDL (ng/L)
PFBS	5	4.2	83	12	1.5	5.1	102	8	1.2
4:2FTS*	5	5.2	104	14	2.1	4.9	98	9	1.3
PFHxA	5	4.1	81	10	1.2	4.7	94	7	1.0
PFPeS*	5	4.1	81	13	1.5	4.8	96	9	1.4
PFHpA	5	4.2	84	8	1.1	4.7	94	7	1.0
PFHxS	5	4.3	85	6	0.7	4.8	96	8	1.2
6:2 FTS*	5	4.6	92	17	2.3	4.8	96	7	1.1
PFOA	5	4.6	92	12	1.6	4.7	94	7	1.0
PFHpS*	5	4.0	80	9	1.0	4.7	95	11	1.6
PFOS	5	4.0	81	15	1.7	4.6	92	6	0.8
PFNA	5	4.0	80	7	0.8	4.8	97	5	0.7
8:2 FTS*	5	5.0	100	22	3.3	5.3	106	11	1.7
PFNS*	5	4.0	81	9	2.1	4.4	91	8	1.1
PFDA	5	4.1	83	8	1.0	4.8	95	10	1.4
N-MeFOSAA	5	3.9	78	15	1.7	4.6	91	9	1.2
N-EtFOSAA	5	3.8	77	11	1.2	4.4	88	10	1.3
PFDS*	5	4.1	82	18	2.2	4.6	92	10	1.4
PFUnA	5	4.1	82	12	1.5	4.4	88	11	1.4
PFDoA	5	4.0	79	14	1.6	4.3	86	9	1.2
PFTriA	5	3.9	78	13	1.4	4.4	87	10	1.3
PFTreA	5	4.0	79	15	1.8	4.3	86	11	1.3

* EPA Method 537 に記載されていない追加の PFAS 化合物

回収率と精度

LC/MS グレードの超純水ブランク 7 個に 60 ng/L の各 PFAS を添加した試料を分析して、真度と精度の実証実験を行いました。表 7 は、7 回測定後の平均測定濃度と、回収率

と相対標準偏差（RSD）として表される真度と精度の評価結果を示しています。LCMS-8045 および LCMS-8050 を使用して得られた回収率はすべて、真値の±20%以内であり、EPA に記載された基準を満たしています。

表 7 LCMS-8045 および LCMS-8050 の 60 ng/L での対象 PFAS の真度（%回収率）および精度（%RSD）

Compound	LCMS-8045			LCMS-8050		
	Average Conc. (ng/L), n = 7	% Recovery	% RSD	Average Conc. (ng/L), n = 7	% Recovery	% RSD
PFBS	52	87	13	54	90	6
4:2FTS*	54	90	13	56	94	8
PFHxA	52	87	12	52	87	9
PFPeS*	54	90	14	54	90	9
PFHpA	53	88	16	52	87	10
PFHxS	54	89	13	54	90	8
6:2 FTS*	55	92	15	55	92	9
PFOA	52	86	14	53	88	11
PFHpS*	54	90	13	53	89	9
PFOS	53	89	17	51	85	12
PFNA	51	86	16	64	107	21
8:2 FTS*	51	86	19	56	93	9
PFNS*	54	89	15	55	92	11
PFDA	52	87	13	52	87	10
N-MeFOSAA	53	88	15	53	88	9
N-EtFOSAA	54	90	15	56	93	10
PFDS*	52	86	17	53	89	9
PFUnA	51	85	11	53	88	10
PFDoA	51	86	14	51	85	9
PFTriA	49	82	14	51	85	9
PFTreA	49	82	14	49	81	8

* EPA Method 537 に記載されていない追加の PFAS 化合物

表8 LCMS-8045 および LCMS-8050 を使用して測定したスパイク試料中サロゲートの平均濃度 (n=7)、%回収率と%RSD

Compound	Fortified Conc. (ng/L)	LCMS-8045			LCMS-8050		
		Average Conc (ng/L), n=7	% Recovery	% RSD	Average Conc (ng/L), n=7	% Recovery	% RSD
M2PFHxA	40	43	107	14	40	101	10
M2PFDA	40	44	109	12	42	106	13
M-N-EtFOSAA	160	175	109	14	160	100	12

サロゲートの回収

サロゲートの回収率は、前処理抽出前の水試料にサロゲートを添加して確認しました。サロゲート添加水試料は、前処理後、LC/MS で分析しました。良好な方法性能を実証するためには、算出したサロゲートの回収率は70~130%の範囲内であればなりません (EPA、9.3.5 項)。

7 個の 250 mL の水試料に、10 ng の M2PFHxA、10 ng の M2PFDA、および 40 ng の M-N-EtFOSAA を添加し、M2PFHxA と M2PFDA を 40 ng/L、および M-N-EtFOSAA を 160 ng/L の濃度としました。LCMS-8045 および LCMS-8050 を使用して算出した回収率を表 8 に示します。すべての回収率は±10% 以内で、EPA 要件が十分に達成されています。

■ まとめと考察

本アプリケーションニュースでは、EPA Method 537 に対する島津 LC/MS/MS の使用方法、性能、および適合性について、7 種類の PFAS 対象を追加して説明および実証しました。すべての試料とブランクを同じ SPE 手順で抽出し、異なる型式の機器で同じ分析条件を使用しました。0.7~1.7 ng/L (LCMS-8050) および 0.7~3.3 ng/L (LCMS-8045) の MDL が得られ、いずれのシステムも飲料水中の PFAS 分析に関する EPA の要件をすべて満たしました。これは、元の EPA Method 537 に記載されている 10 µL よりもはるかに少ない 1 µL 注入で達成されました。注入量が少ない (LC/MS への負担が少ない) ため、分析法の堅牢性が高まり、長期的な所有コストが削減されます。

参考文献

- U.S. EPA, "EPA Method 537: Determination of Selected Perfluorinated Alkyl Acids in Drinking Water by SPE and LC/MS/MS," Washington D.C., 2009.
- ASTM International, "ASTM D7979-17: Standard Test Method for Determination of Perfluorinated Compounds in Water, Sludge, Influent, Effluent and Wastewater by LC/MS/MS," Conshohocken PA, 2017.

LCMS、Nexera、Shim-pack、および Shim-pack Velox は、株式会社 島津製作所の日本およびその他の国における商標です。ISOLUTE は、Biotage AB の商標です。その他、本文中に記載されている会社名および製品名は、各社の商標および登録商標です。本文中では「TM」、「®」を明記していません。

株式会社 島津製作所 分析計測事業部
グローバルアプリケーション開発センター

初版発行：2020年2月

島津コールセンター ☎0120-131691
(075) 813-1691

※本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。
改訂版は下記の会員制 Web Solutions Navigator で閲覧できます。

<https://solutions.shimadzu.co.jp/solnavi/solnavi.htm>

会員制情報サービス「Shim-Solutions Club」にご登録ください。

<https://solutions.shimadzu.co.jp/>

会員制 Web の閲覧だけでなく、いろいろな情報サービスが受けられます。