J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 156, p.41 ～ 48 (2024)

ペル及びポリフルオロアルキル化合物分析技術
― PFAS 海洋化学から PFAS 農業化学へ ―

山下信義 [1]・谷保佐知 [1]・山﨑絵理子 [1]・羽成修康 [1]

1. はじめに

土壌の物理性についての会誌に微量有害物質の化学分析技術について執筆しても興味を引かない恐れがあるため，少し変わった切り口で説明しよう．

ペル及びポリフルオロアルキル化合物（PFAS）は，過去 15 年以上にわたり残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（通称，POPs 条約）の重要議題の一つであった．現時点ではペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS），ペルフルオロオクタン酸（PFOA）及びペルフルオロヘキサンスルホン酸（PFHxS）の 3 物質が POPs 条約に追加されているが，炭素鎖数が 9 ～ 21 と長いものや揮発性前駆体なども今後の条約対象物質への追加が検討されている．これだけではピンとこないが，実際には Fig. 1 に示すように，水素の一部またはすべてがフッ素置換したアルキル基の末端が様々に化学修飾された化合物群が PFAS に含まれるため少なく見積もっても 5000 種類，世界中の質量スペクトルライブラリーを検索すると，OECD の PFAS の定義（OECD, 2018）（例外はあるが，CF_3 または CF_2 を有する化合物）に該当する化合物は，700 万種類以上存在する．

特に，欧州化学品庁（ECHA）では CF_3 または CF_2 分子を基本骨格に有するすべての化学物質を PFAS とする規制案が 2023 年 2 月に提案され，各国産業界等から 6000 件近いパブリックコメント（その半数近くは日本産業界からの要望）が寄せられるなど，フッ素化学物質の生産・使用のあり方の再考が世界中で進められている．

2000 年代初めに Kannan 博士などが世界中の野生動物の血液から PFOS を検出し，3M 社が PFOS を含むスコッチガードの生産から撤退した当時は，C-F 共有結合の強さが PFOS 分子の分解され難さの理由として注目され，一般の注目を煽る「forever chemicals, 永遠の化学物質」というマスコミ造語が使われた．実際には C-F 結合は切断されにくいが，C-C 結合は容易に切断され，アルキル基末端の C-F が C-H に置換する反応が比較的容易に生じることは有機化学の基礎であり，現在では自称専門家やマスコミ以外でこの造語を使う科学者はいない．実際，PFOA 標準液はメタノール標準液内で容易にエステル化するため，アルカリメタノール溶液として安定化させて販売されていることは専門家には常識である．

実は PFAS 問題の本質は「難分解性」ではなく，「幅広い物理化学性」と「環境内構造変換」の二つであることは，国内でも指摘されている（PFAS 対策技術コンソーシアム, 2023; 山下ら, 2022）が，これは既に 2003 年の APME workshop（ドイツ・ハンブルグ 2003 年 5 月）で Mabury 博士他によって指摘された「PFAS 研究の常識」である．PFAS 対策の難しさは，この対象物質の多さ，言い換えると，揮発性から難揮発性，水溶性から難水溶性まで幅広い物理化学性を有する複雑な「化学物質群」を正確に測定できる分析技術開発の困難さと直結する．現在，国内に 100 か所以上点在する米軍駐屯地他からの PFAS 汚染が大きな国内問題となっているが，実際には泡消火剤は PFAS 汚染源のごく一部に過ぎない．半導体製造用のフォトレジスト，製鉄工場防塵剤，フッ素樹脂製造，撥水防汚剤，化粧品など，経済産業省の産業界聞き取り調査でも全ての用途を把握することが困難なほどの多種多様な汚染源が存在することが PFAS 対策の困難さにつながっている．

環境省では，水大気環境局の再編に伴い，課室横断の「PFAS 対策チーム」を 2023 年に設立し，水道水・地下水の全国調査により，全国規模の PFAS 汚染が明らかとなった．共著者の谷保が委員として参加する「PFAS に対する総合戦略検討専門家会議（2023 年 ～）」では，今後全国規模の土壌中 PFAS 汚染状況調査の必要性が指摘されている．このため環境省では，PFOS/PFOA/PFHxS の「3 物質のみ」について土壌分析のための公定法を開発中であるが，この方法では発生源推定が行えない．発生源を推定するためには「PFAS 多成分分析」による濃度組成解析が必要である．したがって全国土壌調査がスタートしたとしても，PFAS の発生源を特定し，それぞれの発生源に適した環境修復技術によって PFAS 汚染を取り除く事は期待できない．PFAS の発生源推定のため

[1] 国立研究開発法人　産業技術総合研究所. Corresponding author. 山下信義
2023 年 12 月 11 日受稿　2024 年 2 月 3 日受理

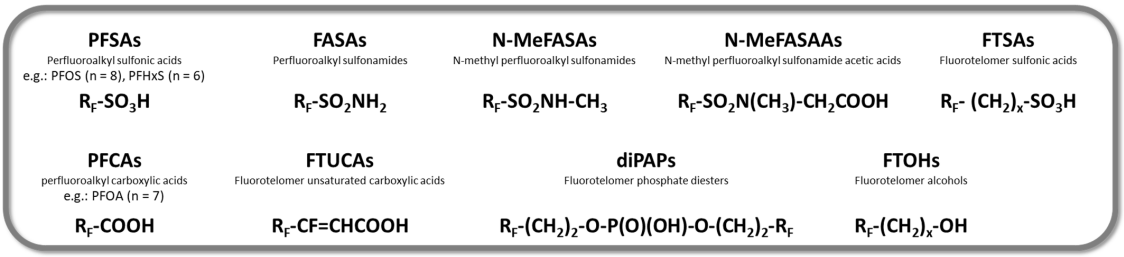


Fig. 1 代表的な PFAS の組成式.

には，ISO 21675 や USEPA Draft Method 1633 に記載のある 30 種類以上の PFAS の一斉分析が必要不可欠であるが，土壌試料中 PFAS の多成分分析を可能にする分析法は，国内では現時点では公開されていない（農林水産省では規格化が進められている）.

2. PFAS 分析技術とは

PFAS はどのように分析されているのか，詳細は既報に譲る（谷保・山下, 2022; 谷保ら, 2012; 谷保ら, 2011）が，ごく簡単に説明してみよう．PFAS 分析化学の専門家には，揮発性から難揮発性，水溶性から難水溶性まで幅広い物理化学性を有する，数千種類の複雑な「化学物質群」が研究対象であるが，一般的には水溶性のペルフルオロアルキルスルホン酸（PFSA）とペルフルオロアルキルカルボン酸（PFCA）の 20 種類前後が測定対象となっている．また現在国内で行われている全国調査の対象は PFOS/PFOA/PFHxS の「3 物質」であり，一般的な研究では炭素鎖数が 4 から 12 前後までが測定対象となっている．スルホン酸もカルボン酸も水溶性の有機酸であり，後述の WAX カートリッジに代表される陰イオン交換樹脂を用いた固相抽出剤に通水することで水試料中の PFAS を濃縮する．適切な溶離液で溶出された PFAS を再濃縮後に LC-MS/MS で測定する．必要に応じて精製操作を加えることもある．2009 年に公開された PFOS/PFOA の世界初の ISO 国際標準分析規格である ISO 25101 に加え，2019 年には異性体も含めると 39 種類の PFAS の分析が可能な ISO 21675 が公開された．水試料を対象とした代表的な PFAS 分析法は「PFAS 対策技術コンソーシアム」データベースに公開されている（https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-org/pdfjs/web/viewer.html?file=A22.pdf）.

ISO21675 の測定感度は 0.2 ng L^{-1} で全ての国際規格のなかで最も高感度であるが，本規格の重要な点は測定感度だけではなく，Betasil カラムと JJ カラムという，二種類の分析カラムを用いる事で，一種類の分析カラムだけで測定する EPA 533, 537.1，1633 等では測定できない，無視する事ができない分析誤差（共溶出現象）を根本的に解決する方法を提示している点である．特に ISO 25101 と ISO 21675 が確立した WAX カートリッジでの固相抽出技術は，土壌，底質，大気等の抽出液中 PFAS を精製し，高感度に LC-MS/MS 測定を可能にする基本技術であり，農林水産省や環境省が現在開発中の土壌中 PFAS 分析告示法にも使われている，全ての環境媒体中の PFAS 測定の基本技術となっている．特に ISO 25101 の翻訳 JIS である JIS K0450-70-10（2011）には，PFAS 分析で生じやすい問題点をどのように解決すればよいかという「systematic な考え方」を「解説」として記載してある．2011 年の古い情報ではあるが，PFAS 研究の初学者が躓く点について理解を助ける参考となる.

上記 ISO 25101 と ISO 21675 は UNEP 国連環境計画でも採用された 30 種類の個別 PFAS 分析技術のデジュール · デファクトスタンダードである．その一方で，数千種類も存在する「総 PFAS」の全体量の把握無しでは，欧州 ECHA 等の要求する産業界規制に対応できない．そのため，産総研が 2006 年に開発した高感度燃焼イオンクロマトグラフ法（CIC），総酸化法（TOP assay），総加水分解法（THP assay）などが，開発されているが，スペースの都合でここでは省略する．関連情報は「PFAS 対策技術コンソーシアム」データベース （A-27. 「総 PFAS 測定と欧州 ECHA 規制案に関して）を参照されたい.

3. 「PFAS 海洋化学」から「PFAS 農業化学」へ

産総研では，1999 年に開始した Kannan 博士との共同研究から一貫して PFAS の高感度高精度分析法開発と環境動態解析研究に専念してきた．外洋海水中の PFAS を 2 pg L^{-1} 以下の極微量で測定できる固相抽出カートリッジ（WAXsea）を Waters 社と共同で開発（山﨑ら, 2015）し，PFOS/PFOA の世界初の ISO 国際標準分析規格である ISO25101 を確立した．この国際規格を用いて日本海表層海水中 PFAS を測定した結果，中国起源の PFAS が日本海を汚染している現状を明らかにした（Yamazaki et al., 2019a）．2015 年には東日本大震災前後の環境試料の PFAS 分析を行い，JAMSTEC と共同で開発したスーパーコンピュータシミュレーションにより，震災直後から PFAS が海流経由で広域拡散する現象を初めて明らかにした（Yamazaki et al., 2015a）．2008 年に公表した太

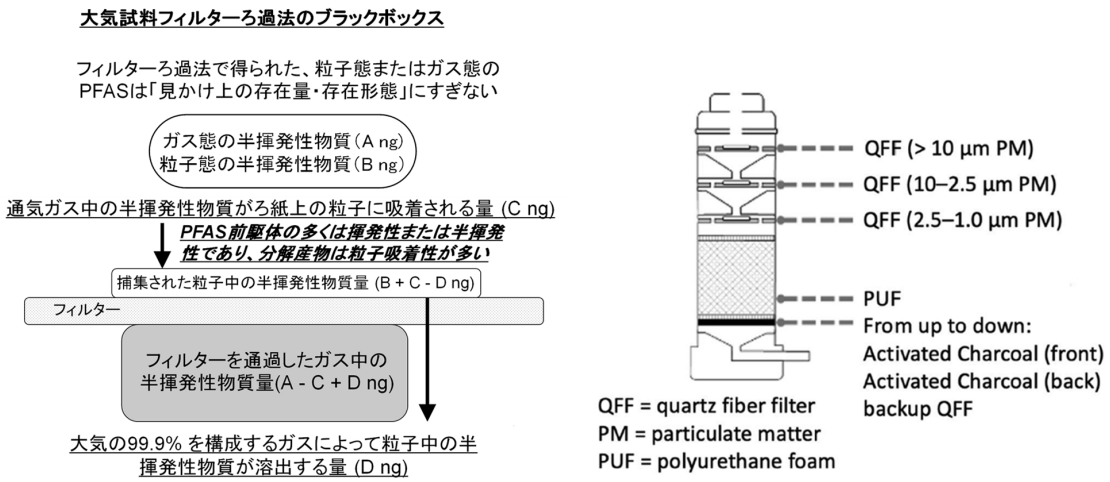


Fig. 2 大気試料フィルターろ過法のブラックボックス（左）および粒子状物質とガスを一斉分離捕集するインパクター（山下・谷保, 2020 より修正）.

平洋 4000m の深層海水中の PFOS の発見から 10 年後，2019 年にカナダ環境省と合同で行った，大西洋外洋海水中の PFAS 大規模調査により，PFAS の海流経由全球汚染を証明し，現在の UNEP 全球調査計画の基礎となる「PFAS 海洋化学」の創始につながった（山下・谷保, 2020; 葛ら, 2016; 山下ら, 2014）.

「PFAS 海洋化学」によって示された「PFAS のブロッカーコンベアベルト海洋大循環」等, 水溶性の PFAS が海流によって地球規模で移動していることが明らかになったが，実は 2003 年の APME workshop では，Mabury 博士他，当時の PFAS 専門家の大部分は，揮発性の PFAS 前駆体が大気経由で全球に運ばれ，輸送先でスルホン酸 · カルボン酸に分解した結果，PFAS の全球汚染が生じると考えていた．これはダイオキシン ·PCB など，大部分が半揮発性化学物質である過去の残留性有機汚染物質（POPs）と同様な考え方である．当時の著名な専門家と張り合う気はなかったため，我々はだれも挑戦しなかった「海流経由の PFAS 輸送」を中心に過去 20 年間研究を継続した結果，「PFAS 海洋化学」の創始につながった．ところが，海流経由全球輸送現象の理解が一段落したため，数年前に大気経由の PFAS 長距離輸送研究がどうなっているか文献検索を行った結果，驚くべきことに，20 年前は強く支持されていた大気中 PFAS 研究について，現在まで信頼できる報告はほとんど無く，わずかに高濃度汚染が期待される発生源近辺の高濃度汚染地域沿岸や室内大気汚染について報告があるだけであった．特に後者では大気中 PFAS の微量分析が困難なため，室内大気を測定する代わりにハウスダスト中の PFAS を測定して大気汚染の指標とするなど，過去 20 年近く，大気中 PFAS 分析技術がほとんど進歩していないことが判明した.

この問題は PFAS の特徴である「幅広い物理化学性」と「環境内構造変換」が直接影響している．すなわち，揮発性の前駆物質が分解して粒子吸着性のスルホン酸類 · カルボン酸類などが生成するため，ガス態の PFAS と粒子吸着性の PFAS を同時に測定しなくては，大気中の PFAS 量の正確な評価はできない．とくに，ハイボリュームエアサンプラー等，従来の POPs に使用されるフィルターで大気中の粒子状物質とガスを分離捕集する装置では，Fig. 2 に示すブラックボックス問題を解決できない.

この問題を解決するため，フィルター法を使わず，インパクターで PM2.5 等にサイズ別に捕集し，ガス状物質の分離捕集を同時に可能とする「ガス · 粒子一斉捕集装置」を開発した．本装置は柴田科学株式会社（NS20）やジーエルサイエンス株式会社（FM4）からも販売されているが，適切な使用のためには事前に ISO 21675 でキャリブレーションを行う必要がある．特に，既存の大気化学分析技術と相互比較するためには，PM2.5 の分級曲線が WINS（Well Impactor Ninety-Six）利用と同等であることを証明する必要もあり，全くの素人が使用しても相互比較性のある測定値を得ることは難しい．詳細は Lin らの文献に報告されている（Lin et al., 2022）が，大気中粒子の性状や測定される PFAS の種類によって必要な吸着剤や前処理技術が決まるため，特に臭素 · ヨウ素置換の PFAS 等，新規 PFAS として使用されている類縁化合物の高精度測定には注意が必要である.

さらに，本技術を高度化する事で，今までにない数の PFAS 一斉分析が可能になった．測定装置として LC-MS/MS を用いる従来の研究では水溶性 · 粒子吸着性の高い 20 種類前後のカルボン酸類 · スルホン酸類しか測定されておらず，最新の国際標準分析法である ISO 21675 を用いても，30 種類の PFAS（分岐鎖異性体を含むと 39 種類）の測定が限界であった．しかし最近，GC-Orbitrap HRMS を用いる事で，36 種類の揮発性 PFAS の分析技術開発に成功した（谷保ら, 2023）．従って，ISO 21675 と GC-Orbitrap HRMS を併用する事で大気中の 73 種類の PFAS を一度に測定することが可能になる（Fig. 3）.

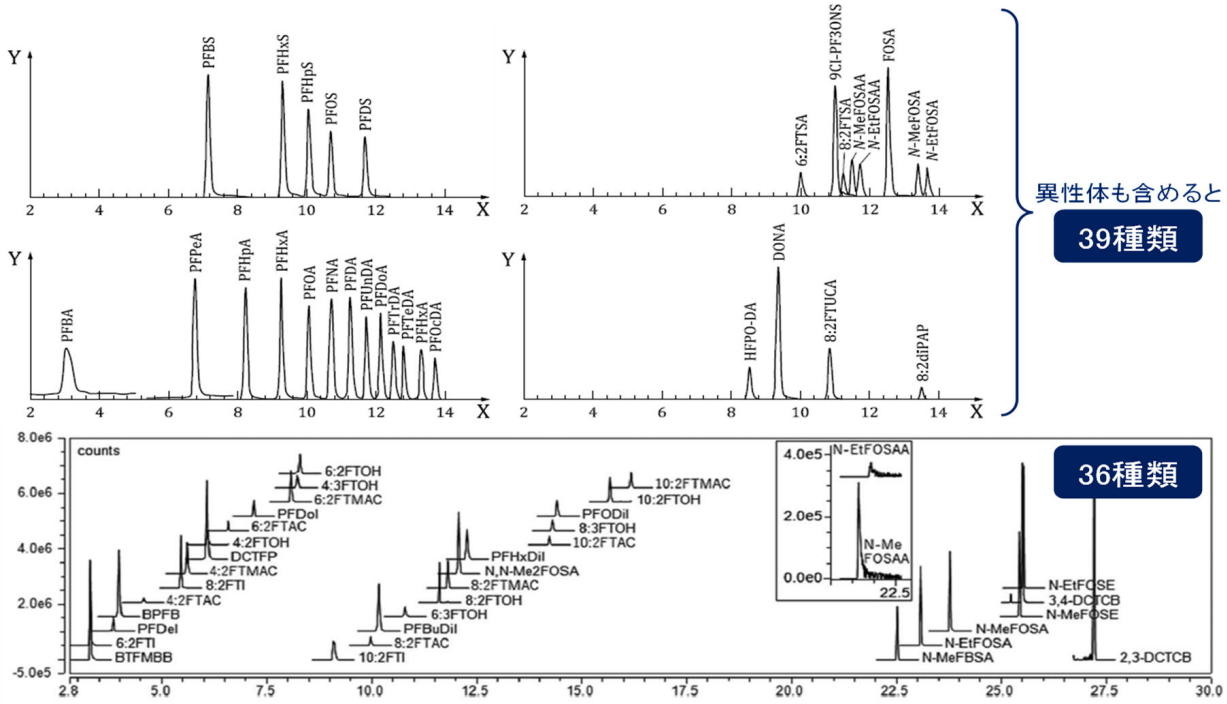


Fig. 3　ISO 21675 を用いて測定可能な 39 種類（異性体も含む）のイオン性 PFAS のクロマトグラム（上段）と GC-Orbitrap-高分解能質量分析計による 36 種類の揮発性（中性）PFAS のクロマトグラム（下段）（ISO 21675 および谷保ら, 2023 より引用）.

これは単に測定数だけの問題ではなく，大気中のカルボン酸類 · スルホン酸類 · アミド類 · テロマーアルコール類等，水溶性 · 難水溶性，揮発性 · 難揮発性の全ての PFAS について同時測定が可能になったことを意味している．

言い換えると，本技術により大気中の PFAS の存在形態の理解が初めて可能になった．

これらの技術を用いて，中国南京大学他との国際共同研究を行い，日本と中国の大気中揮発性 PFAS の測定に初めて成功した（Yu et al., 2020; 谷保ら, 2023）．さらに北極域 · 南極域の大気中ガス態 · 粒子態 PFAS の高精度測定や大気 · 海水間の PFAS の包括的な動態把握を行った結果，外洋大気中の PFAS 存在形態には，ガス · 粒子分配係数（K_p）が大きく影響し，主にヘンリー定数で説明可能な従来の POPs とは，地球化学的環境動態に大きな違いがあることを初めて証明できた（Yamazaki et al., 2021）.

「PFAS 海洋化学」から「PFAS 大気化学」への変遷は上記のとおりであるが，これらの研究ツールを用いて，2003 年の APME workshop と同様に，他の研究者が参入していない研究分野を探索し，ほとんど先例のない農産物中 PFAS の微量分析に 2019 年に挑戦した．その結果，白米 · 稲中に含まれる PFAS 量と潜在的な人暴露リスク評価結果を世界で初めて公表した（Yamazaki et al., 2019b; 2023）．この研究成果は，欧米主導の PFAS リスク評価研究では見過ごされてきた，世界人口の半分を占めるコメ食特有の PFAS 暴露量 · リスク評価の重要性に，世界の目を向けることに成功した．また，稲作研究で使用した PFAS のライシメータ試験を応用し，ソニーグループの開発した，もみ殻から製造する新機能性活性炭である “Triporous ™ - PFAS” を用い，土壌中 PFAS 安定化試験を行った．これにより土壌中の PFAS 漏洩防止を短時間で実現可能な環境修復技術を開発 · 公表し（山崎ら, 2024），関連研究成果（Yamazaki et al., 2019; Eun et al., 2022）は日本環境化学会の 2023 年度環境化学論文賞を受賞した．本研究成果はソニーグループの世界的知名度 · マーケティング活動により，日本発 PFAS 対策技術として世界普及が期待される．特に，スウェーデンのオレブロ大学，産総研とソニーグループが共同提案した研究プロジェクトは Outstanding 評価（総評価 35 点中の評価点が 34 点）で 2023 年に Swedish Research Council（FORMAS）で採択され，欧州で先行する PFAS 対策技術に日本発の産業技術が採用される絶好のチャンスに繋がった．

さて，「PFAS 海洋化学」⇒「PFAS 大気化学」⇒「PFAS 農業化学」と，高度に学際的な研究を展開してきたが，ようやく「PFAS 農業化学」についての説明に移ろう．

4. 土壌中 PFAS 分析技術と環境修復技術

高濃度の PFAS を含む河川水を黒ボク土が充填されたライシメータに通水し，液状活性炭注入による土壌中 PFAS 固定化技術の開発を 2023 年に行った（山崎ら,

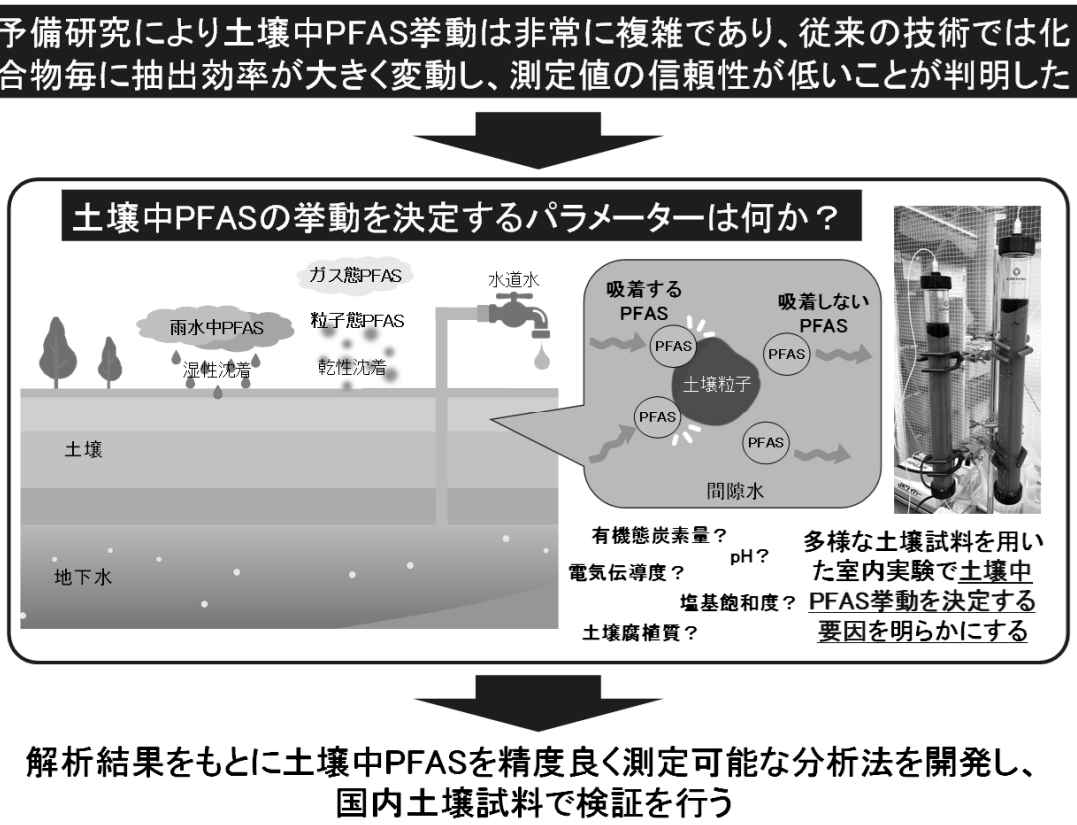


Fig. 4「Yamazaki（2019）および山崎（2024）で明らかになった土壌中 PFAS 挙動の複雑さの理解と環境修復技術開発のためのプロジェクト概要.

2024）．その結果，土壌中 PFAS の固定化に必要な液状活性炭の種類や施肥条件が明らかになったが，予想外の結果として，液状活性炭を注入していない黒ボク土自体が PFAS の吸着能を有する事が明らかとなった．これはスウェーデンの先行研究の結果とは大きく異なり，欧州の褐色森林土と比較して，黒ボク土に豊富に含まれる有機態炭素に PFAS が吸着され，結果として PFAS に一度汚染された国内黒ボク土壌では PFAS 汚染が長期化することが判明した．

また，PFAS 分子の大きさとペルフルオロアルキル基の化学修飾基の種類によって，土壌吸着現象に大きな差が認められた．したがって，土壌腐植質 · 炭素 / 窒素 / リン酸量 · 塩基飽和度 · ミネラル · pH· 電気伝導度 · 陽イオン交換容量等様々な土壌物理化学的パラメーターと土壌粒子への PFAS 吸着現象を解析しなければ，土壌中 PFAS 挙動の理解は難しいと考えられる．

現在の国内 PFAS 問題で注目されている泡消火剤汚染は特殊な例であり，一般土壌への PFAS 汚染源は，大気と地下水（河川伏流水や農業灌漑水も含む）である．一般大気では粒子吸着性の PFAS を含む大気粒子の乾性沈着とフルオロテロマーアルコールなど揮発性成分のガス態としての土壌表面への直接負荷が考えられる．また湿性沈着では雨水 · 降水に溶け込んだ PFAS が同様に土壌表面に負荷される．これらの PFAS は，一部は土壌粒子に吸着し，残りは間隙水中に溶けて土壌内を移動する．前者は PFAS 汚染の長期化につながり，後者は地下水汚染に直結する．したがって，土壌粒子と間隙水間の PFAS 分配現象を決定するパラメーターを特定することで，土壌中 PFAS 残留現象の理解と環境修復技術の開発が可能である．

この観点から土壌中 PFAS 挙動の理解と環境修復技術の開発を目的とした産学官連携プロジェクトが進められている（Fig. 4）．

さて，土壌中の PFAS 濃度は比較的高いため，外洋海水で開発した超高感度分析技術は必要ないという意見もあるが，繰り返しであるが産総研が PFAS 研究を国際的にリードしてこられた理由は，他が追従できないレベルの分析精度管理（Quality Assurance and Quality Control; QA/QC）技術を過去 30 年以上，一貫して追求してきたからである．

これを示す最適の例は，実は PFAS ではなく，2015 年に公表したビスフェノールの分析である．インド · 韓国 · 中国 · 日本の河川水中の 8 種類のビスフェノール類の国際比較を初めて達成した論文（Yamazaki et al., 2015b）であり，CI が 510 を超える高引用件数論文であるが，実は本研究では高価な測定機器や最先端の技術は使わず，博士課程入りたての学生が主導的に行った成果である．内分泌かく乱物質として一時期注目されたビスフェノール A には構造の類似した数種類の関連物質が存在し，この研究では 8 種類のビスフェノール類をインド · 韓国 ·

中国 · 日本の河川水について分析した．ビスフェノール類はバクテリアなどで容易に生物分解を受けるため，試料採集から実験室での化学分析まで速やかに行う必要があるだけでなく，測定機器である LC-MS/MS での装置内部での検量線が作りづらい特徴がある．そのため当時のビスフェノール研究は，プラスチック製品や高濃度排水などの測定例がほとんどであり，低濃度では再現性の悪い，一般環境水中のビスフェノール分析は報告例が非常に少なかった．高価な測定機器を用いても検量線が不安定であれば信頼性の高い測定はできない．この問題を解決するために，分析化学の基礎に立ち戻り，装置内部で多点検量線を作成するのではなく，試料水自体を 5 段階に希釈して，サンプル量をもとに手作業で検量線を作成した．具体的には採取した試料を 5 段階に希釈した試料水をそれぞれ固相抽出（SPE）処理し，その抽出液を LC-MS/MS で分析した．つまり，一点検量線測定を，含有するビスフェノールの量自体を直線的に変化させた水試料ごとに行った事になる．

高価な測定装置 · 解析プログラムや人工知能など，はやりの技術は一切使わず，試料水の希釈 · 抽出操作を 200 回以上，数か月間延々と行った結果である．高価な最先端測定装置のエンジニアには鼻で笑われるような泥臭い作業であるが，Top 10 best publication from 2015 to 2019（Ecotoxicology and Environmental Safety），Top 1 % 高引用論文（Web of Science 調べ）他の論文賞も受賞，CI 510 からも分かるように，ビスフェノール類の環境分析化学分野で必ず引用される論文となった．このことからわかるように，「精密分析化学」において最も重要なことは，高価な装置や流行りの先端技術を使うことではなく，「高度に systematic な思考能力と地道な実験操作」に他ならない．

昨今，PFAS の高感度分析を行うためにはどのような装置を買えばいいかという相談が多数寄せられる．特殊な例では REACH/RoHS 指令対応のため「総 PFAS」を高感度で測定したいので，産総研が 2007 年にプレス発表した 0.6 ng のフッ素測定技術を開示してくれとの問い合わせも増えている．相談元は必ず，どの装置を使っているのかという情報，高感度分析のための Tips を欲しがるが，こちらが丁寧に説明してもだいたいがっかりする．高感度微量分析で最重要なのはブランク管理であり，回収率確認試験と再現性確認試験と三つを合わせて BRR （blank, recovery and reproducibility）を細心の注意を払って，いかに厳密に行うかを説明しても「高度に systematic な思考能力と地道な実験操作」に興味のない一般的な相談者に理解される事は少ない．

「精密分析化学」には早道や Tips は無く，全ての分析操作 · ブランクの可能性 · 回収率や再現性に影響する，機材 · 試薬 · 場所 · 時間 · ヒューマンファクター等，全ての要素を systematic に解析し，最適な分析操作手順を論理的に構築する能力が必要とされる．逆に考えると微量分析化学には「頭のいいひらめき」は不要である．現在まで 70 名以上の留学生を指導してきたが，最初に必ず言うのが “Good chemist needs only two things, carefulness and patience. Please do not be too smart.” であり，20 名近い成功した留学生たち（30 代で国立環境研究所と同レベルの予算規模のラボを任された教授もいる）のほとんどは，この指導をまじめに守った，どちらかといえば地味な学生たちであった．

5. おわりに

土壌物理の門外漢の解説であり，「ペル及びポリフルオロアルキル化合物分析技術 — PFAS 海洋化学から PFAS 農業化学へ」というタイトルにふさわしい知見を十分説明できたかどうかは疑問が残るが，より詳しい情報は「PFAS 対策技術コンソーシアム（https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-org/pfasconsortium.html）」データベースに公開されている．

2023 年 10 月に開催した「PFAS 対策技術コンソーシアム国際講演会」の概要報告（https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-org/pdfjs/web/viewer.html?file=A26.CAR_PFAS_summaryHP.pdf）に記載しているように，本コンソーシアムが設立された 2021 年当時は，国内の一般的な PFAS 研究は，諸外国よりも 15 年近く遅れていた．2019 年の ISO21675 の公開で「PFAS 海洋化学」研究がひと段落したので，国内研究にも目を向けろとの内外のプレッシャーに対応し，なかばいやいや始めたコンソーシアムであるが，文献検索すると国内 PFAS 研究に何が足りないかは明らかであった．内分泌かく乱物質やマイクロプラスチック問題で国内有害物質対策の足を引っ張ってきたリスク評価は「いわゆる専門家？」に任せ，コンソーシアムでは具体的な PFAS 対策立案とその遂行に必要な「計測と環境修復」技術に限定した世界最先端の研究成果の国内普及に専念した．その結果，設立から 2 年半で，国内 PFAS 対策に必要な環境修復技術は特許技術も含めコンソーシアム参加企業で開発済みであり，いくつかは事業化につなげることに成功している．当初は三年間の期間限定であった「PFAS 対策技術コンソーシアム」は 44 の参加団体と 84 名の会員の強い希望で活動を継続する事が決定し，環境省推薦事業となった環境研究総合推進費 1G2102「ペルフルオロアルキル化合物「群」のマルチメディア迅速計測技術と環境修復材料の開発」と合わせて，今後の国内 PFAS 対策を円滑に進めるための活動が産学官組織全てより期待されている．

本コンソーシアムは国内組織にはめずらしく，いかなる組織にも忖度は無く，全ての科学的知見を中立の立場で一般に公開することに努めている．たとえば，コンソーシアムの公開情報を注意深く精査すれば，現在国内で報道 · 議論が自粛されている「PFAS 問題の本質」は専門知識のあるなしにかかわらず，だれにでも推測可能である．わかりやすい日米地位協定問題の他に，昨今の国内先端産業復興政策や，コンサルタント · 代理店依

存の産業構造等，日本の社会システム自体が現在の国内 PFAS 問題の複雑さを招いており，欧州と比較して PFAS 対策が遅々として進まない原因である事はコンソーシアムデータベースを勉強すれば自明である．

ただし，どんな国でも有害化学物質対策と行政 · 社会システムとは密接に関係するために，国内 PFAS 対策の良し悪しの議論や，PFAS 汚染の責任追及に過剰な時間を費やすのは効率的ではない．

今，そこにある PFAS 汚染に適切な環境修復技術を適用し，PFAS の産業界使用量を削減するための「科学技術の普及」に専念する事が PFAS 問題解決の唯一の選択肢である．国外で実用化されている PFAS 環境修復技術をコンソーシアム会員に紹介した結果，半年で特許申請が発出し，既に 20 件以上の国内提案技術が開発されていることからも，日本の産業 · 科学技術開発 · 実用化を適切に進めることで，一般に注目されている PFAS 問題の多くは速やかに解決が期待できる．

PFAS 研究の本質は，実はその後である．PFAS やフッ素系温暖化ガスの最終分解産物であるトリフルオロ酢酸の全海洋中の存在量は 2 億 6 千万トン，PTFE は 8 百万トンと推定されているが，それと比較してペルフルオロカルボン酸（PFCA, PFAS の 1 グループ）の存在量は 3 万トン程度と推定されている．CF_3 の 5 百万トンと比べてもけた違いに少ない．従って地球化学的有機フッ素バジェットの観点では PFAS はフッ素系温暖化ガスよりも重要性は低い．ただし，全てのフッ素化合物の全球挙動を理解する上で，フッ素系温暖化ガス研究の長年のターゲットであった大気化学だけではなく，海洋化学，地質学等，人間の生息可能域（habitable zone）全てを研究対象とする視点を導入した PFAS の意義は大きい．

「PFAS 海洋化学」⇒「PFAS 大気化学」⇒「PFAS 農業化学」への変遷からわかるように，研究対象は変わっても，現象理解の鍵となるのは化学分析技術であり，ISO 21675 に代表される国際的に信頼性が確保された国際標準規格と，そのために構築された高度に厳密な QA/QC である．

全ての自然科学は「仮説の設定」,「実験」,「実験結果による仮説の修正」の繰り返しであり，いかなる仮説も後世の研究によって更新されるため，人類の知的財産として残るのは「仮説」ではなく「実験結果」である．我々の研究論文は「experiment は完璧だが interpretation が少ない」と査読者に指摘されることが多いが，産総研の研究生には「我々の研究は世間よりも 10 年程度進んでいるにすぎない．追試されることで初めてデファクトスタンダードになるから，そのために必要な実験方法 · 結果と QA/QC を必ず論文に記載しなさい．」と指導している．その結果は既に公開されているので皆さんで確認していただきたい（https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-org/library_pfas.html）．拙文が，全ての分析科学者の参考になれば幸いである．

引用文献

Eun, H., Shimamura, K., Asano, T., Yamazaki, E., Taniyasu, S. and Yamashita, N. (2022): Removal of perfluoroalkyl substances from water by activated carbons: Adsorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid. Environmental Monitoring and Contaminants Research, 2: 88–93.

葛 卉, 山﨑絵理子, 谷保佐知, 山下信義 (2016): 環境変動トレーサーとしてのペルフルオロアルキル化合物. 月刊海洋 / 号外, 58: 97–110.

ISO 21675 (2019): Determination of PFAS in water — Method using SPE and LC-MS/MS.

Lin, H., Taniyasu, S., Yamazaki, E., Wu, R., Lam, P.K.S., Eun, H. and Yamashita, N. (2022): Fluorine mass balance analysis and per- and polyfluoroalkyl substances in the atmosphere. Journal of Hazardous Materials, 435: 129025.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2018): Toward a new comprehensive global database of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs): Summary report on updating the OECD 2007 list of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), Series on Risk Management, 39.

PFAS 対策技術コンソーシアム (2023): データベース. https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-org/pfasconsortium.html. （確認 2023 年 11 月 24 日）

谷保佐知, 羽成 修康, 堀井勇一, 山下信義 (2011): PFOS/PFOA の国際標準分析法 ISO 25101 の確立. 環境管理, 47(3): 32–39.

谷保佐知, 羽成 修康, 堀井勇一, 山下信義 (2012): 有害化学物質の環境分析法の標準化. シンセシオロジー, 5(4): 261–276.

谷保佐知, 山下信義 (2022): ペルフルオロアルキル化合物の国際標準分析規格と今後の展望. 環境技術, 51(5): 6–11.

谷保佐知, 山﨑絵理子, 羽成 修康, 山本 五秋, 山下信義 (2023): GC-Orbitrap-HRMS を用いた日本及び中国環境大気中の揮発性ペル及びポリフルオロアルキル化合物分析法の開発. 分析化学, 72(7, 8): 307–316.

山下信義, 谷保佐知, 山﨑絵理子 (2014): ペルフルオロオクタン酸関連物質の外洋汚染全球図の開発のための国際共同研究. 月刊海洋 / 号外, 55: 94–105.

山下信義, 谷保佐知 (2020): 水および大気中有害物質トレーサー研究の最前線ペルフルオロアルキル化合物（PFAS）とビスフェノールを中心に. 水環境学会誌, 43(9): 307–312.

山下信義, 谷保佐知, Prasada Rao Kodavanti (2022): PFAS とは何か？ — 環境測定 · リスクおよび対策 —. 現代化学, 614(52): 52–56.

山﨑絵理子, 谷保佐知, 島村紘大, 佐々木俊哉, 山下信義 (2015): 外洋海水中ペルフルオロ化合物微量分析のための固相抽出法の開発. 分析化学, 64(10): 759–768.

Yamazaki, E., Yamashita, N., Taniyasu, S., Miyazawa, Y., Gamo, T., Ge, H. and Kannan, K. (2015): Emission, dynamics and transport of perfluoroalkyl substances from land to ocean by the Great East Japan Earthquake in 2011. Environmental Science and Technology, 49: 11421–11428.

Yamazaki, E. Yamashita, N., Taniyasu, S., Lam, J., Lam, P.K.S., Moon, H.B., Jeong, Y., Kannan, P., Achyuthan, H., Munuswamy, N. and Kannan, K. (2015): Bisphenol A and other bisphenol analogues including BPS and BPF in surface water samples from Japan, China, Korea and India. Ecotoxicology and Environmental Safety, 122: 565–572.

Yamazaki, E., Taniyasu, S., Ruan, Y., Wang, Q., Petrick, G., Tanhua, T., Gamo, T., Wang, X., Lam, P.K.S. and Yamashita, N. (2019): Vertical distribution of perfluoroalkyl substances in water columns around the Japan sea and the Mediterranean Sea. Chemosphere, 231: 487–494.

Yamazaki, E., Taniyasu, S., Noborio, K., Eun, H., Thaker, P., Kumar, N., Wang, X. and Yamashita, N.(2019): Accumulation of perfluoroalkyl substances in lysimeter-grown rice in Japan using tap water and simulated contaminated water. Chemosphere, 231: 502–509.

Yamazaki, E., Taniyasu, S., Wang, X. and Yamashita, N. (2021): Per- and polyfluoroalkyl substances in surface water, gas and particle in open ocean and coastal environment. Chemosphere, 272: 129869.

Yamazaki, E., Eun, H., Taniyasu, S., Sakamoto, T., Hanari, N., Inui, H., Wu, R., Lin, H., Lam, P.K.S., Falandysz, J. and Yamashita, N. (2023): Residue distribution and daily exposure of per- and polyfluoroalkyl substances in Indica and Japonica Rice. Environmental Science and Technology, 57: 4208–4318.

山﨑絵理子, 谷保佐知, 羽成修康, 三木芳恵, 金子蒼平, 山下信義 (2024): 液状活性炭注入による黒ボク土中 PFAS 安定化技術の ISO21675 を用いた評価. 分析化学, 73(1, 2): 31–37.

Yu, N., Wen, H., Wang, X., Yamazaki, E., Taniyasu, S., Yamashita, N., Yu, H. and Wei, S. (2020): Nontarget discovery of per- and polyfluoroalkyl substances in atmospheric particulate matter and gaseous phase using cryogenic air sampler. Environmental Science and Technology, 54(6): 3103–3113.

This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY-NC-ND) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).