

## 代替 PFAS の安全性に新たな知見—PFBS が発生期の代謝と器官機能に影響

### ポイント

- ① PFOS・PFOA など従来型 PFAS（有機フッ素化合物）の規制が進む一方、代替 PFAS の安全性情報は十分ではありません。日本では 2025 年、PFBS が水環境の「要調査項目」に追加されました。
- ② ゼブラフィッシュ胚を PFBS に曝露すると、体内に蓄積し、糖・脂質代謝が乱れました。続いて酸化ストレスや細胞死が増え、心臓機能、顔面形成、神経発生、視覚機能にも影響がみられました。
- ③ 短鎖型で蓄積しにくいとされる代替 PFAS でも、発生期の生物に影響を及ぼす可能性があります。本研究は、新しい PFAS の安全性評価に役立つ基礎データです。

### 概要

PFAS は、幅広い産業用途で使用されてきました。近年、PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）や PFOA（ペルフルオロオクタン酸）への規制が進む一方、代替として使用される新しい PFAS については、その安全性に不明な点が残されています。

今回、九州大学大学院農学研究院の謝 家暉准教授を中心とする国際共同研究グループは、短鎖 PFAS の一種である PFBS（ペルフルオロブタンスルホン酸）について、ゼブラフィッシュを用いて発生期への影響を解析しました。その結果、PFBS が代謝のバランスを乱し、細胞ストレスを引き起こすことで、複数の器官の発生や機能に影響する可能性を明らかにしました。

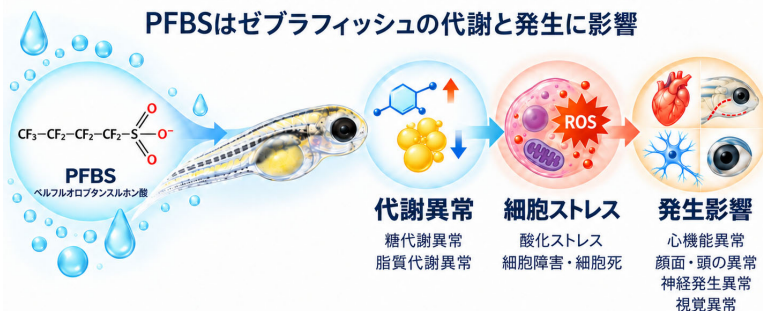
研究では、PFBS 曝露によって糖や脂質の代謝異常、酸化ストレス、細胞死が増えるとともに、心臓機能、顔面形成、神経発生、視覚機能にも変化が認められました。遺伝子発現解析と生理・発生学的解析を組み合わせることで、PFBS による発生毒性を多面的に評価しました。

本研究グループはこれまで、従来型 PFAS である PFOS による脂質代謝異常や脂肪肝との関連を報告し、さらに PFHxS（ペルフルオロヘキサンスルホン酸）についても代謝異常や酸化ストレスを介した発生影響を明らかにしてきました。今回の PFBS 研究は、こうした一連の研究を新しい代替 PFAS へと発展させた成果であり、短鎖 PFAS についても代謝の乱れを原因とする生物影響に注意する必要性を示しています。本研究成果は、国際学術誌「Journal of Hazardous Materials Advances」に 2026 年 9 月 28 日（月）（現地時間）に掲載されました。

## 短鎖PFASは安全？

ゼブラフィッシュ研究は「短鎖PFASも安全とは限らない」ことを示唆

PFBSはゼブラフィッシュの代謝と発生に影響



### 研究者からひとこと：

PFOS や PFOA の規制が進む一方、代替 PFAS の安全性データは十分ではありません。『代替だから安全』と仮定せず、一つずつ科学的に評価することが重要です。（謝 家暉）

短鎖 PFAS の一種 PFBS は、ゼブラフィッシュにおいて代謝異常と細胞ストレスを引き起こし、発生に影響を及ぼす可能性が示唆された。

※本画像は、謝准教授のアイデアをもとに ChatGPT で作成しています。

## 【研究の背景と経緯】

PFAS は非常に分解されにくい化学物質群で、撥水・撥油性や耐熱性を利用して幅広い産業用途に使われてきました。日本では PFOS、PFOA、PFHxS の製造・輸入などが原則禁止され、2026 年 4 月から PFOS と PFOA は水道水の水質基準（合算 50 ng/L 以下）の対象となっています。

PFBS は、長鎖型 PFAS の代替として利用が広がった短鎖型 PFAS です。日本では 2025 年 9 月に環境省の水環境「要調査項目」に追加され、存在状況や毒性に関する知見を集める対象となりました。

研究グループは 2016 年に PFOS による脂肪肝に関連する代謝変化を報告し、2023 年には PFHxS が糖・脂質代謝、酸化ストレス、発生に影響することを報告しました。PFHxS 論文

([Perfluorohexanesulfonic acid \(PFHxS\) induces oxidative stress and causes developmental toxicities in zebrafish embryos - ScienceDirect](#)) は米国環境保護庁（EPA）の HERO データベースにも収載されています。さらに Environmental Science & Technology では、胎盤を介した PFAS 移行と胎児曝露の意義についても報告しています ([Beyond a Barrier: Placental PFAS Transfer and Early-Life Metabolic Programming | Environmental Science & Technology | ACS Publications](#))。今回、より短鎖の PFBS へ研究対象を広げました。

## 【研究の内容と成果】

### 1. PFBS は発生期のゼブラフィッシュ体内に蓄積

受精直後から PFBS に曝露し、死亡率への影響がほとんど認められなかった 0.1  $\mu\text{M}$  を中心に詳しく解析しました。体内 PFBS 量は増加しました。

### 2. 糖・脂質代謝の乱れから細胞ストレスへ

RNA-seq では遺伝子の発現が変化し、特に糖・脂質代謝と酸化ストレスに関わる経路が影響を受けました。PFBS 曝露群では血糖値の上昇、インスリン関連遺伝子の低下、脂質蓄積がみられ、活性酸素、脂質酸化、細胞死も増加しました。

### 3. 心臓機能、顔面形成、神経発生、視覚機能にも影響

心臓では拍動やポンプ機能が低下し、顔面では顎軟骨とコラーゲンに変化がみられました。神経系では脳形成や軸索に関わる指標が低下しました。眼では網膜全体の構造は保たれていましたが、暗所視に重要な杆体視細胞と暗所適応行動に変化がみられました。

### 4. 代謝の乱れを起点とする発生毒性の枠組み

これらの結果は、PFBS による代謝恒常性の乱れが酸化ストレスや細胞死を介し、発生中の複数器官に影響する可能性を示します。ただし、各段階の因果関係や人への影響は、今後さらに検証する必要があります。

## 【今後の展開】

今回の研究は、短鎖型の代替 PFAS についても「蓄積しにくい」ことだけで安全性を判断できない可能性を示しました。今後は、より長期・低濃度の曝露、代謝異常と器官障害の因果関係、ほかの動物モデルでの再現性を調べる必要があります。

本研究は PFBS の規制値を直接提案するものではありませんが、PFOS・PFOA だけでなく、代替 PFAS も含めた安全性評価を進めるための基礎情報になると期待されます。

### 【謝辞】

謝 家暉グループの研究は、日本学術振興会（JSPS）の二国間交流事業（JPJSBP120239930）の支援を受けています。Zulvikar Syambani ULHAQ は、武田科学財団（TSF）の外国人留学助成（2020 年）、日本学術振興会（JSPS）の外国人研究者招へい事業（2024 年）、および国際脳研究機構（IBRO）の交換フェローシップ（2023 年、2025 年）の支援を受けています。Keng Po LAI グループについては、本論文に記載された研究に対して、中国香港特別行政区研究助成評議会（UGC/FDS16/M04/25）、香港都市大学（HKMU）教員研究スタートアップ基金（FRSF/2024/02）、および HKMU 研究開発基金（RD/2025/1.29）からの助成金により一部支援を受けました。Yun-Jin JIANG グループの研究は、台湾国立衛生研究所（MG-112-PP-09 および MG-113-PP-09）および台湾国家科学技術委員会（NSTC 112-2320-B-400-011-MY3）からの助成金を受けています。May-Su YOU グループの研究は、台湾科学技術部（MOST 111-2320-B-400-019-MY3）からの助成金を受けています。ゼブラフィッシュのリソースは、台湾ゼブラフィッシュ技術・リソースセンター（114-22740-B-400-001）から提供・支援されています。Jingru QIN は現在、科学技術振興機構（JST）の K2-SPRING プログラム（JPMJSP2136）の支援を受けています。Delbert Almerick T BONCAN および Ting Fung CHAN は、香港特別行政区政府創新及科技委員會から国家重点実験室「農業生物体」の助成金による支援を受けました。

### 【論文情報】

掲載誌：Journal of Hazardous Materials Advances

タイトル：Perfluorobutane sulfonate induces metabolic stress leading to cellular stress and developmental defects in zebrafish embryos

著者名：Zulvikar Syambani ULHAQ, Delbert Almerick T BONCAN , Da-Wei LIU , Chen HSU, Jingru QIN, Jen - Kun CHEN, May-Su YOU, Ting Fung CHAN, Yukiko OGINO, Yun-Jin JIANG, Keng Po LAI, William Ka Fai TSE

D O I : 10.1016/j.hazadv.2026.101596

### 【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学大学院農学研究院 准教授 謝 家暉

TEL : 092-802-4767 FAX : 092-802-4544

Mail : kftse@agr.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp