

プラネタリーヘルスと麻酔

徹底分析
シリーズ

吸入麻酔薬の環境負荷

揮発性吸入麻酔薬の
ライフサイクルを通じた
環境負荷について考える

重松 研二

近年、議論が続いていた温室効果ガスであるデスフルランの使用制限については、欧州で例外的使用が認められるなど一定の落ち着きをみせている。しかし、揮発性吸入麻酔薬を含め、化学的に安定し長期間環境中に滞留する有機フッ素化合物は、生物や人体への影響が懸念されており、世界的に排出削減の方向に進んでいる。

本稿では、揮発性吸入麻酔薬のライフサイクル（製造・使用・排出）を通しての環境への負荷について考えてみたい。

1/3a 17w 誌

スミベタ
文・白スミ
13a 新ゴM

メモ

地球温暖化係数 global warming potential over 100 years (GWP100)：温室効果ガスが「100年間」に地球をどれだけ温暖化させるかを、CO₂ = 1とした相対指標。

SHIGEMATSU, Kenji
福岡大学病院 手術部

0.551ケイ・色ベタ・天地1431

文・白スミ
シマダ・スミベタ
24a 新ゴM MB101 H36a 新ゴB
色ベタ・スミベタ32a 新ゴM
色ベタ・スミベタ
Y40

亜酸化窒素

亜酸化窒素は1997年の京都議定書で認定された温室効果ガスで、オゾン層破壊作用もある。大気中できわめて安定し、寿命が120年以上と非常に長い。そのため、大気中に放出された亜酸化窒素は長時間地球環境に影響を与え続けることになる。地球環境負荷の大きさや、セボフルラン、デスフルラン、プロポフォールなど新しい麻酔薬の登場により、全身麻酔時に亜酸化窒素は使用されなくなっている。

2024年、米国麻酔科学会と英国王立麻酔科医学院は、中央配管からの亜酸化窒素の供給を停止し、麻酔器に設置した小型ボンベからの供給に切り替えることを推奨する声明を発表した¹⁾。英国ではさらに、2027年までにこれを完了することを推奨している²⁾。これらの声明では、全身麻酔での亜酸化窒素の使用量減少に加え、亜酸化窒素の80～100%が中央配管から漏洩し、患者に使用されることなく大気中へ放出されているため、医療費削減の観点からも供給方法の変更が望ましいとしている。日本でも、Mizutaniら³⁾が日常的な医療ガス配管からのホースの

着脱や麻酔器の点検、その他の理由で手術室に供給される亜酸化窒素の56%が患者に投与されることなく大気中に漏出していたと報告している。新しく建築された病院では、亜酸化窒素の中央配管を設置していない施設もある。現在、全国の医療施設の実態を把握するための調査が進められている。

デスフルラン
使用制限の現状

2022年にEU（欧州連合）は、2026年からデスフルランの使用を禁止、または厳しく制限すると提案し、2024年から一部の国では実際に使用が制限された。この提案では、地球温暖化係数（メモ）を指標として評価し、デスフルランは強力な温室効果ガスであること（表1）、臨床上のメリットより環境への負の影響が上回っていることを示唆している⁴⁾。しかしその後、揮発性吸入麻酔薬の大気中濃度と放射強制力にもとづいた評価（表2）では、揮発性吸入麻酔薬が地球環境に与える影響はきわめて小さい⁵⁾、あるいは亜酸化窒素を含めた揮発性吸入麻酔薬の排出は、今後50～100年で0.032～0.064℃とわずかな温度上昇しかもたらさない⁶⁾という対立的な主張がなされた。

表中 ケイ
0.2551ケイ・白スミ（以下同）▼表1 揮発性吸入麻酔薬の地球温暖化係数
（文献4より、改変）

	地球温暖化係数（100年値）
亜酸化窒素	298
ハロタン	50
エンフルラン	689
イソフルラン	510
セボフルラン	130
デスフルラン	2540

さらに、患者の安全と臨床医の自律性を守る観点からデスフルランの使用制限の再考を促す見解も示された⁷⁾。多くの議論が続けられた結果、欧州で2026年1月1日からデスフルランの日常的使用は禁止されたが、例外的な使用については表3のように定められた⁸⁾。事前の許可は必要なく、これにより患者の最善の利益のために迅速に対応する能力は維持されることになった。

PFASと
揮発性吸入麻酔薬

PFAS（per-and poly-fluoroalkyl substances）とは、主に炭素とフッ素からなる有機フッ素化合物で、ペルフルオロアルキル化合物およびポリフルオロアルキル化合物の総称である。分類の仕方によって数が異なるが、1万種類以上の物質があるとされている。

PFASは強く安定した炭素-フッ素結合をもち、加水分解、光分解、微生物分解および代謝に対して耐性がある。溶剤、半導体原料、繊維・革・紙・プラスチックなどの表面処理剤、金属メッキ処理剤、泡消火薬剤、フッ素ポリマー加工助剤、界面活性剤など幅広い用途で使用されている。PFASは便利な一方で、その難分解性、高拡散性から生物・人体への影響が懸念されている。

▼表2 温室効果ガスの放射強制力（文献5より、改変）

	大気中の濃度（ppt）	大気中の寿命（年）	放射強制力（W/m ² ）
二酸化炭素	420000000	100 <	2.16
メタン	1920000	12.4	0.54
亜酸化窒素	336000	123	0.21
イソフルラン	0.11	3.5	0.00003
セボフルラン	0.16	1.4	0.00003
デスフルラン	0.37	14.1	0.00017
吸入麻酔薬全体	0.53	—	0.00021

▼表3 欧州で認められたデスフルランの例外的使用（文献8をもとに、作成）

	内容
使用する条件	医学的な必要性により、医師の専門的な判断でほかの麻酔薬が使用できない場合に認められる。
事前の許可	必要なし。
記録義務	使用した場合、その医学的正当性を書面で記録しなければならない。
保管義務	記録は5年間保管しなければならない。

難分解性 → 1/4a 17w 誌（以下同）
PFASは化学的にきわめて安定であることから自然界ではほとんど分解されず、半減期は数十年と言われている。このことから永遠の化合物“forever chemical”とも呼ばれている。分解されないため、廃棄されると長期間環境中に滞留することになる。

高拡散性

PFASは水溶性のため、環境中に放出された場合、水系を通して広範囲に拡散しやすい。人の生活圏から離れた極域に生息するホッキョクグマからの検出例があることから、拡散性の高さがわかる。

健康への影響の懸念

PFASについてはこれまで多くの研究や調査が行われている。人体への蓄積も確認されており、主な摂取経路は食事や飲料水と考えられている。最もよく知られた事例は、米国の化学メーカーの工場からの排水による環境汚染をめぐる訴訟である。近隣牧場で牛が大

量死したことを契機に、地域住民数万人を対象としてPFAS曝露量と健康影響が調査された。その結果、血中コレステロール値の高さや、腎臓癌、甲状腺疾患、潰瘍性大腸炎、妊娠高血圧との間に関連が報告された⁹⁾。この調査結果は近隣住民による集団訴訟につながり、後に和解が成立した。また、この事例を題材とした映画も公開され、使用規制以前にはPFASが大量に使用されていたこと、さらに現在も世界各地で検出されていることを社会に広く認識させる契機となった¹⁰⁾。日本においても、今年に入り、ある地域の住民の血液から極めて高濃度のPFASが検出されたというニュースが報道された¹¹⁾。この事例に関しては、現時点で実際の健康被害との関連は明らかではない。しかし、PFASについては、血中コレステロール値の上昇、発がん性、免疫系への影響などとの関連が報告されていることから、国は引き続き国内外の最新情報の収集と、検出状況の把握を進めている。

徹底分析
シリーズ

プラネタリーヘルスと麻酔 14a ロダンB ⑤

排出削減の動き ⑤ 色バタ

PFASは環境や人体への影響が懸念されていることから、世界的に排出削減に向けた動きが進んでいる。PFASの一種であるPFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸, perfluorooctanesulfonate）、PFOA（ペルフルオロオクタン酸, perfluorooctanoic acid）は環境中での残留性、生物蓄積性、人間や生物への慢性毒性をもつため、残留性有機汚染物質 persistent organic pollutants (POPs) の製造および使用の廃絶・制限、排出の削減、廃棄物等の適正処理等を規定しているPOPs条約では、PFOS、PFOAについて製造、使用、輸出入を制限または禁止としている。PFOSやPFOAは、以前フライパンのコーティングや撥水スプレーなどに使用されていた。現在では使用されておらず、新たに製造されることはないが、分解されにくい性質があるため、今も環境中に残存している。

PFASに含まれる揮発性吸入麻酔薬

セボフルランやデスフルランなどの揮発性吸入麻酔薬は、主に炭素やフッ素を主成分とするフッ素化合物であり、広義にはPFASに分類される。近年、PFASによる環境負荷や地球温暖化への影響が注目されていることから、揮発性吸入麻酔薬に対して否定的な印象を抱く向きもあるかもしれない。しかし、安全性の観点からみると、揮発性吸入麻酔薬は麻酔学の発展に大きく貢献してきた。エーテル、クロロホルム、ハロタンなど初期の揮発性吸入麻酔薬は、可燃性、爆発性、臓器毒性といった問題が存在した。一方、セボフルランやデスフルランは不燃性であり、

高濃度酸素を使用する手術室環境でも安全に使用できる。また、化学的安定性が高く、体内で分解、代謝されにくいいため、臓器への影響も比較的少ない。このようにPFASに分類される揮発性吸入麻酔薬の開発によって、われわれ麻酔科医はより安全に全身麻酔管理を行うことが可能となった。この点は、環境問題を議論する際にも忘れてはならない重要な側面である。

Kalmarら¹²⁾は、揮発性吸入麻酔薬の環境問題はこれまで地球温暖化ばかりに焦点が当たっていたが、PFASに分類され、環境に残存する揮発性吸入麻酔薬の生態系への影響を見逃していたと指摘している。彼らは、麻酔薬が環境に及ぼす真の負荷を理解するためには、温室効果ガス排出量だけでなく、化学的持続性や生態毒性を含めたより広範なライフサイクルアセスメントが必要であると結論付けている。

代替となり得る気体の薬物：
キセノン

キセノンは1898年に発見された不活化元素である。医療分野では、キセノンの放射性同位体や非放射性のキセノンガスが肺血流シンチグラフィ、脳血流の測定などに用いられている。キセノンには麻酔作用があり、以下のような特徴をもつ。

- ①血液ガス分配係数が0.115と現在使用されているどの揮発性吸入麻酔薬よりも低いので覚醒が早い。
- ②催奇形性がないので妊婦の全身麻酔に有効な可能性がある。
- ③鎮痛作用が強く、心機能を抑制しない。手術侵襲に対する血行動態、カテコールアミン分泌反応を抑え

るので、心機能低下や血行動態が不安定な患者の管理に適している。³⁹⁾

④N-メチル-D-アスパラギン酸(NMDA)受容体拮抗作用により、動物実験では脳保護作用があることが報告されており¹³⁾、術後の認知機能障害を予防できる可能性が示唆されている。

⑤悪性高熱症を引き起こさない。

⑥工業的、人工的に生成できず、大気中に存在するキセノンを分離・凝集したものを使用しているため、大気中のキセノンの総量は変化せず地球環境に及ぼす影響はない。

キセノン麻酔には上記のような多くの利点があり、特に地球環境への関心が高まった2000年代以降、欧州諸国で臨床での使用が認められたが、残念ながら広く普及するには至っていない。その理由として、キセノンを分離・凝集する過程で相当量のエネルギーを必要とし、工業用の需要が多く需給バランスがとれていないためキセノン自体のコストが高いこと、麻酔管理に使用するためには新規設備が必要なこと、亜酸化窒素と同様に術後の悪心・嘔吐作用や閉鎖腔へ拡散する性質をもつことなどが考えられる。

余剰麻酔ガスの
回収

余剰麻酔ガスの回収については以前から研究が進められてきた。欧州では、揮発性吸入麻酔薬を使用する場合、余剰麻酔ガスの回収装置を使用することを推進しており、臨床での使用も始まっている。しかし、余剰麻酔ガス回収装置は以前から回収率の低さが指摘されており、CONTRAfluran™の捕捉

効率を臨床現場で検証した最近の研究では、その回収率は約45%と決して高くない¹⁴⁾。要因としては、患者の体内に残留した薬物が抜管後に呼気として放出されることや装置からの微細な漏れなどが挙げられている。回収装置は環境保護に寄与する有用なツールであるものの、完全に放出を防ぐことはできないため、より根本的な排出削減策との併用が重要である。

低流量麻酔

欧州麻酔・集中治療医学会は、医療現場における温室効果ガス排出量削減のため、直接排出量、サプライチェーンと廃棄物管理、エネルギー消費、医療従事者の健康とセルフケアなどの推奨事項を提示している¹⁵⁾。

揮発性吸入麻酔薬の直接排出量を削減するために、低流量麻酔は絶対に行うべきである。腹腔鏡下胆嚢摘出術を異なる新鮮ガス流量(1 L/min vs. 2.5 L/min)で管理した結果、1 L/minの低流量麻酔はセボフルランの消費量を減らし、コスト削減につながり、同時に患者の安全性も確保できたと報告している¹⁶⁾。また、低流量麻酔では温かく湿った患者の呼気を再呼吸するため、気管纖毛上皮を保護するという生理学的な利点もある。

一方で、新鮮ガスを減らすと回路内の酸素や揮発性吸入麻酔薬の濃度が低くなり、低酸素症や術中覚醒が起こる可能性があるため、麻酔回路内のガスの濃度を常にモニタリングしておくことは必須である。また、麻酔回路内の二酸化炭素吸収剤の主成分は水酸化カルシウムであり、二酸化炭素と反応す

ると水が産生される。低流量麻酔を長時間行くと麻酔回路内に結露がつき、一方向弁や人工鼻に不具合が生じる可能性があることも知っておいてほしい。新しい麻酔器内部は、加温装置により結露が発生しにくくなっているが、古い麻酔器を用いて低流量麻酔を行う場合は注意が必要である。また、低流量麻酔や手術件数の増加により、今後、二酸化炭素吸収剤の使用量は増えていくと予想されている。

文献 ⑤ 色バタ

1. American Society of Anesthesiologists. Statement on deactivating central piped nitrous oxide to mitigate avoidable health care pollution. (https://www.asahq.org/standards-and-practice-parameters/statement-on-deactivating-central-piped-nitrous-oxide-to-mitigate-avoidable-health-care-pollution) (2026年1月26日閲覧)
2. Royal College of Anaesthetists. Nitrous oxide : end of the (pipe) line. 2025. (https://rcoa.ac.uk/bulletin/winter-2025/nitrous-oxide-end-pipeline) (2026年1月26日閲覧)
3. Mizutani K, Hiratsuka T, Tsuchiya M. Nitrous oxide leakage caused by routine daily hose disconnection and anaesthetic machine checks. Br J Anaesth 2025 ; 134 : 1247-8.
4. Hendrickx JFA, Nielsen OJ, Hert SD, et al. The science behind banning desflurane : a narrative review. Eur J Anaesthesiol 2022 ; 39 : 818-24.
5. Slingo JM, Slingo ME. The science of climate change and the effect of anaesthetic gas emissions. Anaesthesia 2024 ; 79 : 252-60.
6. Soepyan FB, Happer W, Wrightstone G. Emissions of anesthetic gases cause negligible warming. 2024. (https://co2coalition.org/publications/emissions-of-anesthetic-gases-cause-negligible-warming/) (2026年2月2日閲覧)
7. Kranke P, Jakobsson J, Marin L, et al. Protecting clinician autonomy and patient safety within the climate debate : the case for desflurane in modern anaesthesia. Curr Opin Anaesthesiol 2026 ; 39 : 115-25.
8. European Commission. F-gases in equipment and products. 2024. (https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fluorinated-greenhouse-gases/stakeholder-obligations/f-gases-equipment-and-products_en) (2026年2月16日閲覧)
9. C8 Science Panel. 2020. (https://www.c8sciencepanel.org/?utm_source=chatgpt.com) (2026年5月21日閲覧)
10. Robuck A. What "Dark Waters" gets right about the DuPont/PFAS water pollution case. MASSIVE SCIENCE. 2020. (https://massivesci.com/articles/dark-waters-pfas-focus-features-mark-ruffalo-anne-hathaway-sloan/?utm_source=chatgpt.com) (2026年5月21日閲覧)
11. TBS NEWS DIG. 住民の血液から高濃度PFASアメリカの指標の110倍を超える値も 飲用井戸から全国最悪のPFASが検出された地域で今必要なことは…? 広島. 2026年2月15日放送. (https://newsdig.tbs.co.jp/articles/rcc/2464030?display=1) (2026年2月16日閲覧)
12. Kalmar AF, Zieleskiewicz L, Crimaldi D, et al. Environmental harm from anaesthesia : the importance of clinical realism and chemical persistence. BJA Open 2025 ; 16 : 100490.
13. Ma D, Yang H, Lynch J, et al. Xenon attenuates cardiopulmonary bypass-induced neurologic and neurocognitive dysfunction in the rat. Anesthesiology 2003 ; 98 : 690-8.
14. Mulier H, Struys MMFR, Vereecke H, et al. Efficiency of CONTRAfluran™ in reducing sevoflurane pollution from maintenance anaesthesia in minimal flow end-tidal control mode for laparoscopic surgery : efficiency of CONTRAfluran™. Anaesthesia 2024 ; 79 : 849-55.
15. Gonzalez-Pizarro P, Brazzi L, Koch S et al. European Society of Anaesthesiology and Intensive Care consensus document on sustainability : 4 scopes to achieve a more sustainable practice. Eur J Anaesthesiol 2024 ; 41 : 260-77.
16. Kutlusoy S, Koca E, Aydin A. Reliability of low-flow anesthesia procedures in patients undergoing laparoscopic cholecystectomy : their effects on our costs and ecological balance. Niger J Clin Pract 2022 ; 25 : 1911-7.