月例卓話

全球の堆積物中に広がった
人為由来化合物から人新世を定義する

土　居　秀　幸*

1　はじめに

工業生産やエネルギー消費などの経済活動が拡大するにつれて，人間が生産・使用する化学物質や燃焼由来の物質は，活動の中心地から離れた地域にも広く認められるようになった（Wania and Mackay, 1996; Steffen et al., 2015）．湖や海の底に残されたこれらの物質を調べることは，経済活動の発展に伴って人間の影響が広がってきた歴史を読み解く手がかりとなる．

湖底や海底の堆積物は，こうした物質の移動と蓄積を年代順に保存する記録媒体である．別府湾では，ポリ塩化ビフェニル（PCB）の濃度や異性体組成から汚染履歴と発生源が検討され（Takahashi et al., 2020），マイクロプラスチックの堆積記録からは長期的な蓄積と沈降過程が調べられている（Hinata et al., 2023）．

人為起源物質の代表的な指標に，球状炭化粒子（spheroidal carbonaceous particles：SCP）がある．SCP は石炭や石油の工業的な高温燃焼によって生じる，炭素を主成分とする微粒子である．特徴的な球状の形態をもち，堆積物中でも分解されにくいため，過去の化石燃料利用を調べる指標として用いられてきた．欧米の湖沼では 19 世紀半ば以降の地層に現れ，世界各地の湖沼記録には，電力需要の拡大と石油火力発電の導入が進んだ 1950 年ごろからの急増が認められる（Rose, 2015）．SCP は，工業化を支えたエネルギー利用の拡大を，地層に残る粒子として捉えられる点に特徴がある．

また，20 世紀には PCB などの合成化学物質やプラスチックが大量に生産・使用され，その痕跡が堆積物にも記録されるようになった（Kuwae et al., 2024）．これらは地層の目印となるだけでなく，生物への影響という観点からも重要である．例えば，PCB については，シャチの体内濃度を用いたモデル解析から，繁殖や免疫への影響が個体群の存続を脅かすと予測されている（Desforges et al., 2018）．また，海洋で汚染物質を吸着したプラスチックをメダカに与えた実験では，一部の化学物質の体内蓄積と肝臓への影響が示された（Rochman et al., 2013）．

指標ごとに捉える人間活動や環境影響は異なる．SCP は化石燃料の燃焼を，PCB などの合成化合物は工業生産・利用に伴う汚染を，人工放射性核種は核実験などの活動を記録する．これらの出現や急増を比較することで，人間活動の拡大を複数の側面から読み解くことができる．

堆積物は生物の記録も保持する．筆者らは堆積物に残る環境 DNA を用い，別府湾における過去約 300 年間の魚類の変動（Kuwae et al., 2020），琵琶湖のミジンコ類の過去約 100 年間の休眠卵生産（Tsugeki et al., 2022），ヤマトヒゲナガケンミジンコの個体群動態（Nakane et al., 2023）を検討してきた．化学分析と環境 DNA は，堆積物から環境と生物の履歴を読み取る相補的な手段である．

2　人新世の境界を地層に求める

人新世は，人間活動が地球システムを根本的に変えるようになった時代を表す概念である．人口，

*京都大学大学院　情報学研究科　生物圏情報学講座　教授

第 431 回京都化学者クラブ例会（令和 8 年 5 月 9 日）講演

エネルギー消費，工業生産などが 1950 年ごろから急拡大した「大加速」は，その始まりの有力な候補とされてきた（Steffen et al., 2015）．人新世作業部会は，別府湾を含む候補地の地層を比較し，最終的にカナダのクロフォード湖で 1952 年に対応する層準を境界とする国際標準模式地（GSSP）を提案した．別府湾では 99 指標を統合し，1953 年層の基底より上で人為痕跡が急増することが示されている（Kuwae et al., 2023）．

2024 年 3 月，この年代区分の提案は否決され，人新世は正式な地質年代として認定されなかった（IUGS・ICS, 2024）．しかし，人間活動による地球の変化を表す概念としての議論は続いている．農耕や産業革命に由来する影響が古くから存在する中で，問われるのは，いつ人間の影響が地球規模の力になったかである．Kuwae et al.（2024）は，各地の人為痕跡が急増する時点を比較することで，この問いに地層から答えようとした．

3　世界 137 地点の記録を統合する

研究では，世界 137 地点の 388 記録から，過去約 7700 年間に及ぶ計 748 の人為痕跡を抽出した（図 1）．対象は，年縞をもつ湖沼・海底堆積物，サンゴ骨格，氷床コア，樹木年輪など，年代の精度と時間分解能の高い公開記録である．多様な物質や生物群集を同じ時間軸に並べることで，一地点の変化を全球的な転換と対比できる．

痕跡として数えるのは，人工物質などの初出現，指標値の顕著な増減，それ以前の変動範囲を超える値の出現，増減速度の転換，微化石群集や化学組成の大きな変化である．したがって，痕跡数は化合物の種類数や汚染濃度の総和ではなく，各記録に刻まれた変化の時点を集計した値となる．生物の初出現も，当該地点の記録で初めて認められたことを指す．

まず各年の痕跡数を，その年に利用できる記録数に対して 100 記録当たりに換算した．次に痕跡の累積割合に対し，一つの変化点を求める解析と，五つの折れ点によって時系列を複数の直線区間に分割する解析を行い，増加の時期と速さを調べた．転換点の解析には，データが疎な古い時期を避け，1400 年以降の 724 痕跡を用いた．さらに地域別

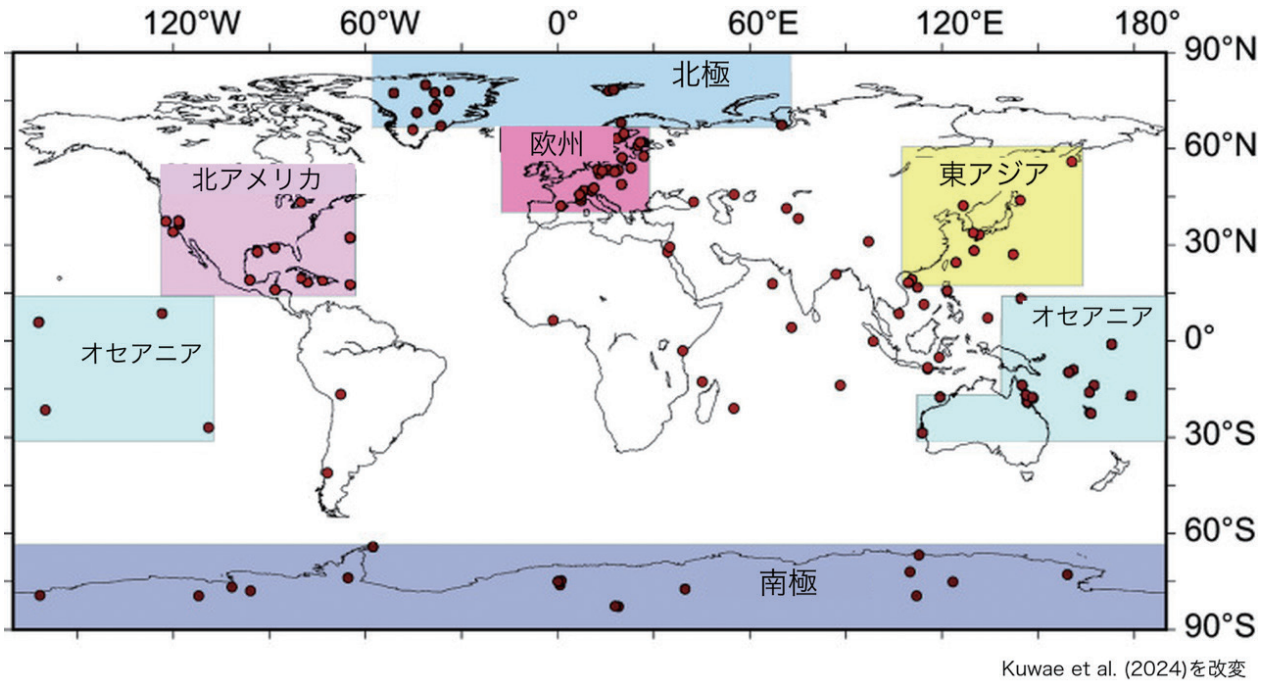


図 1　人為痕跡の解析に用いた世界 137 地点．赤丸は堆積物，サンゴ骨格，氷床コア，樹木年輪などの記録地点．地域名を日本語化．Kuwae et al.（2024）を改変（原図 1）．

図 1〜4 の原著作権 ©2024 Kuwae et al., published by PNAS. CC BY 4.0

の累積割合の傾きを比較し，急増の同時性を評価した（Kuwae et al., 2024）．

4　1952 年前後に集中した人為痕跡

年間痕跡数は 18 世紀後半以降に増え，1952～1957 年には 100 記録当たり 4.8～7.6 件に達した（図 2）．累積割合の曲線にも，20 世紀半ばの急な立ち上がりが認められる（図 3）．全データを用いて一つの転換点を求める解析では 1952 年，五つの転換点を求める解析では 1884 年，1942 年，1953 年，1957 年，1972 年が得られた．増加が最も速かったのは 1953～1957 年である．

放射性核種や別府湾の記録を除く，背景値を定める期間を変える，地域間のデータ量を調整するなど，13 通りの条件でも解析した．その結果，主要な転換点は 1876 ± 10 年，1935 ± 10 年，1952 ± 3 年にまとめられ，最も急な増加は 1952 ± 3 年から 1957 ± 1 年までの区間に認められた．ここでの年代幅は，条件を変えた解析間のばらつき（1 標準偏差）を表す．

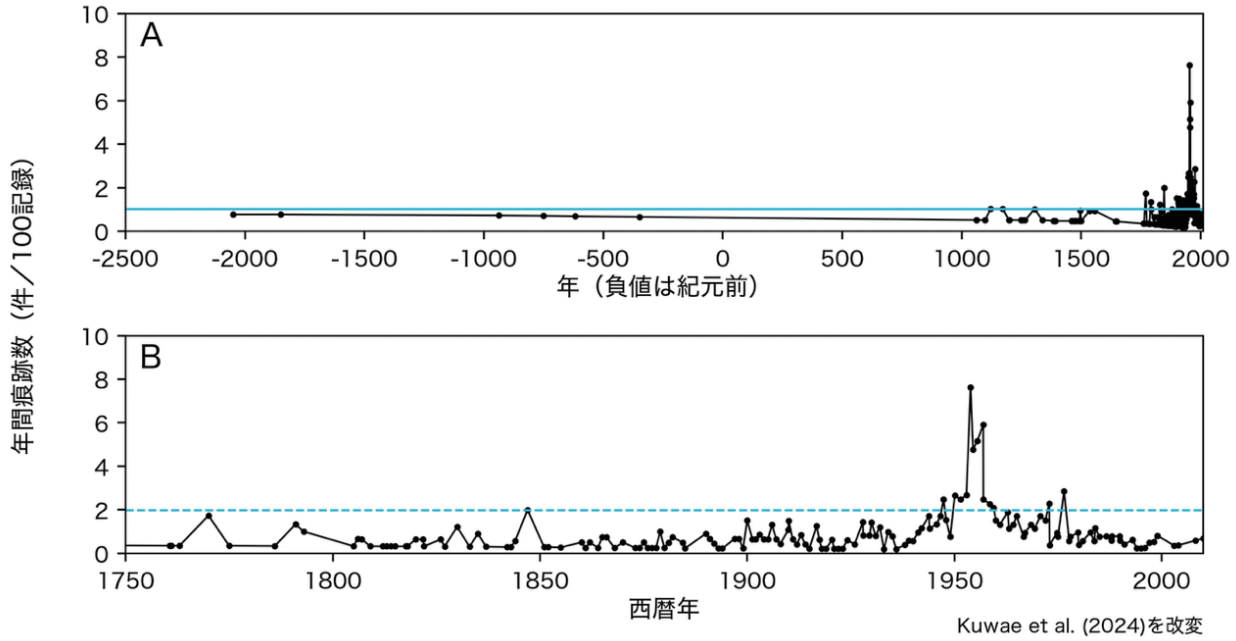


図 2　100 記録当たりの年間人為痕跡数．（A）長期変化．（B）1750～2010 年の拡大．水色の実線・破線は，それぞれ 1750 年以前，および 1750 年から 1930 年代までの最大値．Dataset S05 から再描画・日本語化．Kuwae et al.（2024）を改変（原図 2）．

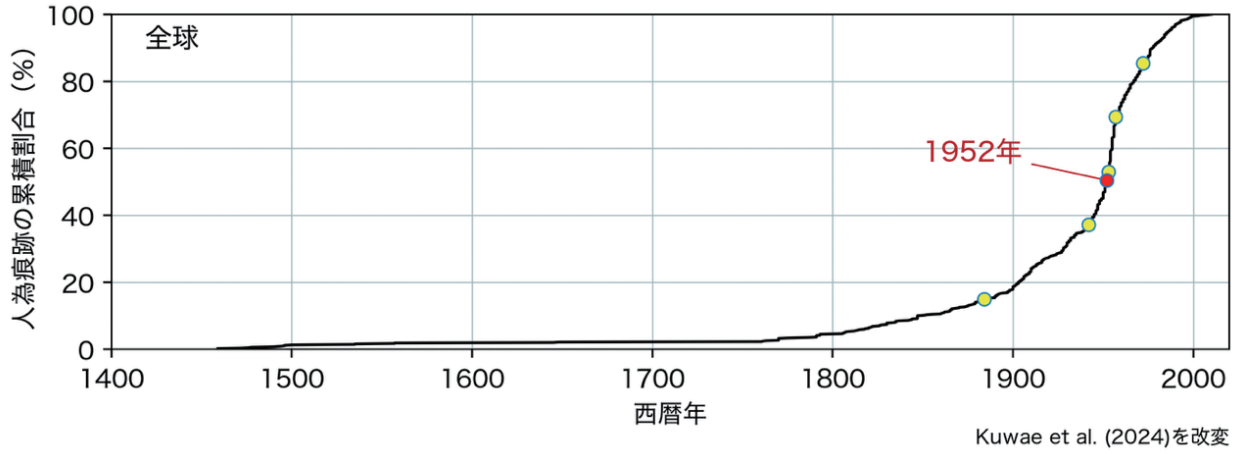


図 3　1400 年以降の 724 痕跡の累積割合．赤丸は一つ，黄丸は五つの転換点を求めた解析の結果．Dataset S04 から再描画・日本語化．Kuwae et al.（2024）を改変（原図 3）．

地域別にみると，南極，北極，東アジア，ヨーロッパ，北アメリカ，オセアニア，その他の地域のすべてで，累積割合の傾きが最大となる時期は1953～1958年に集中した（図4）．大加速に対応して，多様な痕跡の急増が遠隔地を含む全球でほぼ同時に現れたのである．

プルトニウムの記録との比較も，この年代を支持する．Kuwae et al.（2024）がまとめた初検出年代は1945.8±1.3年であるのに対し，急増年代は1953.8±2.0年で，多様な痕跡の転換年代と整合した．別府湾の堆積物とサンゴの放射性炭素を組み合わせた解析も，核実験由来のシグナルを精密に位置づける基盤となっている（Yokoyama et al., 2022）．この対応は，プルトニウムの急増を境界の対比指標に用いる解釈を支える．

5　地域的な改変から地球システムの転換へ

原論文は，三つの転換期を，その背景にある物理・化学・生物過程と結びつけて論じている．1870年代前後には極域の鉛汚染や湖沼の富栄養化，SCPの出現など，産業革命の広域的な影響が認められる．しかし地域ごとの応答には，しば

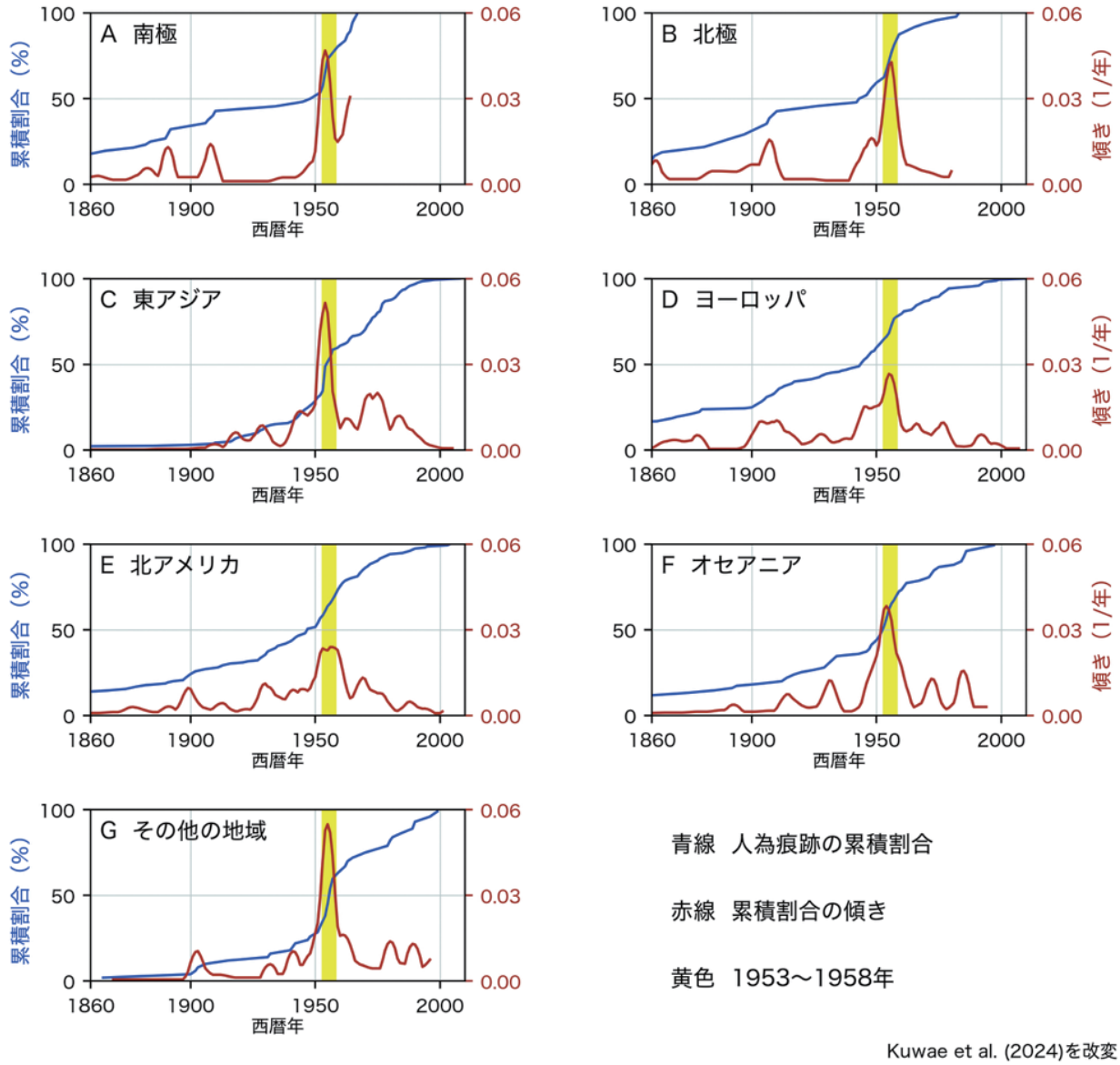


図4　地域別の累積割合（青，左軸）と傾き（赤，右軸）．傾きは累積割合を0～1として連続7年の直線回帰で算出．黄色は1953～1958年．Dataset S04から再描画し，日本語化・配置変更．原図の灰色帯は省略．Kuwae et al.（2024）を改変（原図4）．

しば30年を超える時間差があった．1930年代前後にも，金属や燃焼由来粒子の増加，炭素・ホウ素同位体比の変化がみられ，化石燃料利用，鉱工業，土地利用改変，海洋酸性化などの進行が記録された（Kuwae et al., 2024）．

これに対し1950～1958年には，PCB，殺虫剤DDT，マイクロプラスチックなどの新たな人為物質と人工放射性核種の記録が重なり，全地域で痕跡が急増した．原論文が重視するのは，その後に続く地球システムの変化との関係である．温室効果ガスの増加，魚鱗・堆積物・サンゴ・氷に記録される窒素同位体比の変化，海洋酸性化などが，多様な過程に人間の影響が及ぶことを示している．物質の生産と排出の拡大は，既存の物質循環の改変にもつながったと解釈される（Kuwae et al., 2024）．

この急増は，化学物質の利用，エネルギー供給，生産，輸送が結びついた技術システムの拡大とも対応する．Haff（2012）は，化石燃料に支えられた大量・長距離の物質輸送を地球システムの新たな働きとして論じた．Kuwae et al.（2024）は，人為痕跡の全球的な増加を，こうした「テクノスフィア」が地球の物理・化学・生物過程を大きく変えるようになった時点の指標として位置づけている．

したがって，1952±3年という境界候補は，人為影響の最初の出現を意味するものではなく，多様な痕跡が全球規模で急増し始める転換点を表す．地域ごとに時期の異なる改変が積み重なったそれ以前の地層と，20世紀半ば以降の地層とを区別するための根拠となる．原論文は，最大の増加区間の始点であり，プルトニウムの急増とも整合するこの年代を，人新世の始まりを定義する有力な候補として提案した（Kuwae et al., 2024）．

6　データ集約と情報学から人為影響を読み解く

このKuwae et al.（2024）の研究は，各地で蓄積されてきた分析値を集約することで，人間の影響を地球規模の現象として捉えられることを示した．筆者は共同研究者としてデータ解析を担当した．情報学的な要点は，異なる物質，地域，記録媒体のデータを，人為痕跡の出現年代という共通の情報に整理し，比較可能にすることにある．その上で，累積割合の変化点や増加区間を統計的に求め，データの選び方を変えた解析を比較した．個々の測定を統合し，複数の解析から共通する年代を抽出することで，一地点の記録だけでは捉えにくい全球的な転換点が見えてきた．

化学物質の多様性そのものを把握するためにも，国や地域をまたぐデータ集約が重要である（Wang et al., 2020）．堆積物の分析値に加え，採取地点，年代，測定法，検出基準などの情報を整理・共有すれば，新しい地点や指標を加えて地域間の共通性と相違を継続的に検討できる．これは，経済活動の拡大に伴う人間の影響を，各地の地層記録から広域的に読み解くための基盤となる．

今後は，大量のデータで事前学習した基盤モデルなどのAIを，このようなデータ集約と解析に活用することも考えられる．大規模言語モデルによる論文からのデータ抽出は材料科学で検討されており（Polak and Morgan, 2024），多様な地球環境データを学習し，大気汚染などの予測に応用する基盤モデルも報告されている（Bodnar et al., 2025）．堆積物研究でも，文献中の測定値や年代情報の抽出，指標名・単位の統一，異なる記録間の照合を支援する用途が考えられる．さらに，時系列に共通する変化や地域ごとの特徴を探索する手法への発展も期待される．原記録との照合と地球化学的な解釈を組み合わせながら，データ集約，統計解析，AIをつなぐことが，人間活動の影響をより多くの記録から検討する研究につながると考える．

引用文献

Bodnar, C. et al. (2025) A foundation model for the Earth system. Nature, 641, 1180–1187. doi:10.1038/s41586-025-09005-y.

Desforges, J.-P. et al. (2018) Predicting global

killer whale population collapse from PCB pollution. Science, 361, 1373–1376. doi:10.1126/science.aat1953.

Haff, P. K. (2012) Technology and human purpose: the problem of solids transport on the Earth's surface. Earth Syst. Dynam., 3, 149–156. doi:10.5194/esd-3-149-2012.

Hinata, H. et al. (2023) A 75-year history of microplastic fragment accumulation rates in a semi-enclosed hypoxic basin. Sci. Total Environ., 854, 158751. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.158751.

IUGS・ICS (2024) The Anthropocene: IUGS–ICS Statement. https://www.iugs.org/the-anthropocene-iugs-ics-statement/

Kuwae, M., Tamai, H., Doi, H., Sakata, M. K., Minamoto, T. and Suzuki, Y. (2020) Sedimentary DNA tracks decadal-centennial changes in fish abundance. Commun. Biol., 3, 558. doi:10.1038/s42003-020-01282-9.

Kuwae, M. et al. (2023) Beppu Bay, Japan, as a candidate Global boundary Stratotype Section and Point for the Anthropocene series. Anthropocene Rev., 10, 49–86. doi:10.1177/20530196221135077.

Kuwae, M. et al. (2024) Toward defining the Anthropocene onset using a rapid increase in anthropogenic fingerprints in global geological archives. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 121, e2313098121. doi:10.1073/pnas.2313098121.

Nakane, K., Liu, X., Doi, H., Dur, G., Kuwae, M., Ban, S. and Tsugeki, N. (2023) Sedimentary DNA can reveal the past population dynamics of a pelagic copepod. Freshw. Biol., 68, 1917–1928. doi:10.1111/fwb.14096.

Polak, M. P. and Morgan, D. (2024) Extracting accurate materials data from research papers with conversational language models and prompt engineering. Nat. Commun., 15, 1569. doi:10.1038/s41467-024-45914-8.

Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T. and Teh, S. J. (2013) Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. Sci. Rep., 3, 3263. doi:10.1038/srep03263.

Rose, N. L. (2015) Spheroidal carbonaceous fly ash particles provide a globally synchronous stratigraphic marker for the Anthropocene. Environ. Sci. Technol., 49, 4155–4162. doi:10.1021/acs.est.5b00543.

Steffen, W. et al. (2015) The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. Anthropocene Rev., 2, 81–98. doi:10.1177/2053019614564785.

Takahashi, S. et al. (2020) Characterization of mono- to deca-chlorinated biphenyls in a well-preserved sediment core from Beppu Bay, Southwestern Japan: Historical profiles, emission sources, and inventory. Sci. Total Environ., 743, 140767. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.140767.

Tsugeki, N., Nakane, K., Doi, H., Ochi, N. and Kuwae, M. (2022) Reconstruction of 100-year dynamics in Daphnia spawning activity revealed by sedimentary DNA. Sci. Rep., 12, 1741. doi:10.1038/s41598-021-03899-0.

Wang, Z., Walker, G. W., Muir, D. C. G. and Nagatani-Yoshida, K. (2020) Toward a global understanding of chemical pollution: A first comprehensive analysis of national and regional chemical inventories. Environ. Sci. Technol., 54, 2575–2584. doi:10.1021/acs.est.9b06379.

Wania, F. and Mackay, D. (1996) Tracking the distribution of persistent organic pollutants. Environ. Sci. Technol., 30, 390A–396A. doi:10.1021/es962399q.

Yokoyama, Y. et al. (2022) Plutonium isotopes in

the North Western Pacific sediments coupled with radiocarbon in corals recording precise timing of the Anthropocene. Sci. Rep., 12, 10068. doi:10.1038/s41598-022-14179-w.