

暗黒な海に存在する溶存有機物

北海道大学 大学院地球環境科学研究所 山下 洋平

海洋には、大気中 CO₂ に匹敵する量の溶存有機物が存在する。太陽光の当たる表層では、溶存有機物は、光合成による有機物の生産、それに伴うあらゆる生物活動において生成され、微生物や光化学反応により分解される。一方、太陽光の届かない深層では、微生物による分解が卓越するが、溶存有機物の大部分は分解を免れ安定に存在すると考えられている。この安定性から、海洋溶存有機物は地球表層の活動的な炭素循環には関与していないとされてきた。しかし、その概念を覆すような結果が蓄積し始めている。

炭 素循環と海洋溶存有機物

地球表層には非生物態有機物プールが存在し、その安定性は地球表層の炭素分布を制御する。海洋における非生物態有機物の大部分は、溶存有機物として存在し、そのプールサイズは大気中 CO₂ や土壌有機物に匹敵する。海洋溶存有機物の大部分は、太陽光の届かない海洋深層に安定に存在すると考えられ、地球表層の炭素循環を考える上で注目されてこなかった。しかし、仮に海洋溶存有機物プールが 0.5% yr⁻¹ で増加しているとすると、その増加速度は化石燃料燃焼に伴う CO₂ 放出速度の 3 割以上に相当する。このように、海洋溶存有機物プールの定常性を理解することは喫緊の課題であると言えるが、定常性を制御する海洋溶存有機物の動態（供給・除去・安定性）に関する定量的な知見は十分とは言えない。

安 定な？ 海洋溶存有機物

溶存有機物とは、天然水を 0.2 - 0.7 μm の濾紙を用いて濾過した際の濾液に含まれる有機物と定義されるが、その 95 - 99% は非生物態有機物である。海洋に溶存有機物が 1 mgC L⁻¹ 程度の濃度で普遍的に存在することは 1950 - 1960 年代に報告され、海洋溶存有機物は極めて安定であると考えられた。1987 年には海洋溶存有機物の炭素 14 年代が ~6,000 年であることが報告され、その安定性が裏付けられた。また、炭素安定同位体比から、安定な溶存有機物の大部分は海洋生物により生成されると考えられるようになった。

数千年の滞留時間を有すると考えられる溶存有機物の分解に関する知見を室内実験から得ることは困難であるが、その知見は千年の時間スケールを有する深層循環と比較することで得られる。1990 年頃に溶存有機炭素濃度を高精度で測定可能な手法が確立され、大洋スケールでの調査が行われた結果、その濃度は時空間的に変動することが明

らかとなった。極めて安定な系と考えられていた海洋深層においても、その循環に伴い溶存有機炭素濃度が 3 割程度も減少することが示された。また、溶存有機物の炭素 14 年代に関しても大洋スケールでの分布が示されつつあり、その年代は（後述する深海熱水などからの供給を除き）深層循環が進むにつれ徐々に古くなるようである (Druffel *et al.*, 2022)。すなわち、溶存有機物は、深層循環による輸送過程でゆっくりと除去され、炭素 14 年代も古くなると考えられる。著者らのグループは、溶存有機物の中でも微生物分解に対して安定であると考えられる成分に着目し、大洋スケールの調査から、それらの動態を解明してきた (図 1)。

海 洋溶存有機物中の腐植物質

土壌中での有機物の安定化メカニズムはいくつか考えられているが、その 1 つが構造的に安定な腐植物質の形成である。溶存有機物の中にも土壌腐植物質と同様な蛍光スペクトルを示す成分が存在することは古くから知られており、腐植様蛍光物質と称されていた。外洋域における腐植様蛍光物質が栄養塩型（表層で低濃度、深層で高濃度）の鉛直分布を示すことは知られていた。表層での低濃度は光分解の結果であることが実験的に示されたが、その起源に関しては良く理解されていなかった。2000 年代後半以降に全海洋において腐植様蛍光物質の大洋スケールでの分布が示された結果、深層では腐植様蛍光物質と見かけの酸素消費量の間には正の直線関係があることが示され (図 2 (a))、腐植様蛍光物質は海洋内部におい

て微生物による酸素消費（主に沈降粒子中有機物の分解）に伴い生成し、生成後は微生物分解を受けない安定な成分であることが示された。微生物により深層で生成される腐植様蛍光物質の年代は沈降粒子中有機物と同等の新しい年代を示すと予想される。すなわち、深層における溶存有機物は除去されるだけでなく、除去と生成が同時に起きている動的な状態にあり、そのバランスにより濃度や炭素 14 年代が決定されていると考えざるを得ない。

外 来性の溶存有機物

前述したように、溶存有機物は海洋生物由来であると古くから考えられてきたが、その化学的根拠は溶存有機物の炭素安定同位体比であった。一方、海洋溶存有機物は様々な炭素安定同位体比および炭素 14 年代を有する化合物の集合体であることを示す結果が報告された (Druffel *et al.*, 2022)。これらの結果は、海洋溶存有機物中には、炭素 14 年代が新しい成分が存在することを明示したと同時に、炭素安定同位体比から溶存有機物の起源を決定する難しさも示した。すなわち、海洋に存在する安定な溶存有機物の起源として、海洋の外から供給される溶存有機物を再評価する必要がある。

燃 焼起源の溶存有機物

陸起源の溶存有機物としては、高等植物のバイオマーカーであり、腐植物質の材料成分とされるリグニンに焦点が当てられ研究がなされてきた。その結果、海洋全域にリグニンが存在することが示された。一方、そ

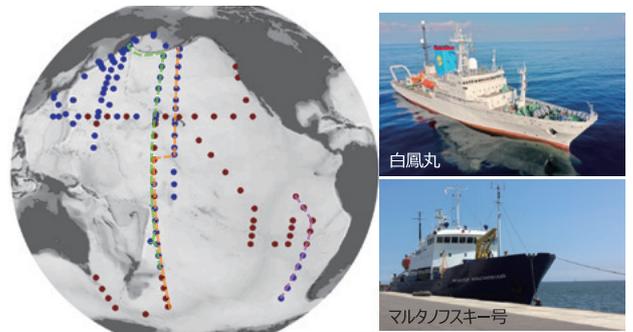


図 1 大洋スケールの溶存有機物分布を明らかにするための試料採取が実施された観測点。青色の観測点は著者自身、茶色の観測点は共同研究者により試料採取が行われた。太平洋の観測は白鳳丸（海洋研究開発機構）、ロシア EEZ 内の観測はマルタノフスキー号（ロシア極東海洋気象学研究所）により行われた。

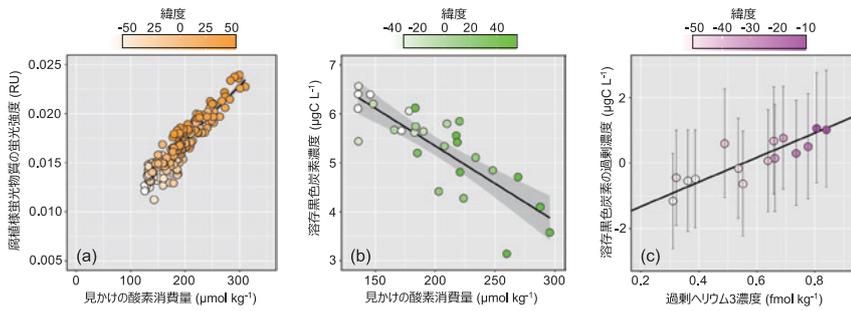


図2 太平洋深層において発見された溶存有機物と海洋学パラメータの関係。(a) 図1のオレンジ観測線における腐植様蛍光物質の蛍光強度と見かけの酸素消費量の関係、(b) 図1のグリーン観測線における溶存黒色炭素濃度と見かけの酸素消費量の関係、(c) 図1のマゼンダ観測線における溶存黒色炭素の過剰濃度と過剰ヘリウム3濃度の関係。Yamashita and Tanoue (2008) *Nat. Geosci.*, 1, 579-582; Yamashita et al. (2022) *Nat. Commun.*, 13, 307; Yamashita et al. (2023) *Sci. Adv.*, 9, eade3807 を改変。

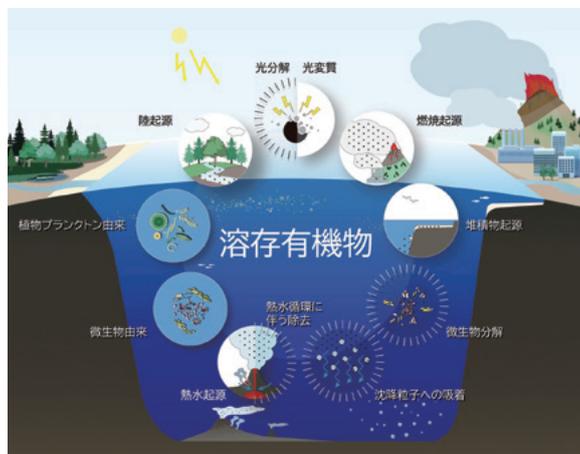


図3 海洋における溶存有機物動態の概念図。

の濃度から海洋溶存有機物に含まれる陸起源有機物は数%程度であると推察され、その大部分は太陽光による光分解により除去されると考えられている。一方、土壌中には木炭などの燃焼起源炭素も安定に存在することが知られており、近年、その一部が可溶化し、河川へと流出することが示された (Coppola et al., 2022)。この水溶性の燃焼起源炭素は、溶存黒色炭素と定義され、河川溶存有機物の約10%を占めることも示された。

溶存黒色炭素も光分解するが、微生物分解を受け難いため、海洋内部に輸送された後は安定に存在するはずである。海域および水深は限られているが、海洋における溶存黒色炭素の炭素14年代が求められ、~23,000年と極めて古いことも報告された (Coppola et al., 2022)。すなわち、海洋深層は陸上の燃焼活動に伴い生成された溶存黒色炭素の究極的なシンクと考えられる。一方、太平洋における溶存黒色炭素の南北断面分布が観測された結果、太平洋深層における溶存黒色炭素の濃度は深層循環が進むにつれ低くなる傾向にあることが示され、その濃度と見かけの酸素消費量の間には負の直線関係があることが明らかとなった (図2(b))。この直線関係は「見かけ上」の関係であり、その背景には

複数の要因が隠れていると推察され、様々な要因が検討された。その結果、海水中の溶存黒色炭素は、沈降粒子に吸着除去され、海底堆積物へと輸送され、蓄積すると解釈されている。

熱水起源の溶存有機物

熱水域も溶存有機物の起源となり得る。熱水循環に伴い海水中の溶存有機物濃度は低くなるが、熱水域に棲む化学合成微生物により炭素14年代の極めて古い溶存有機物が生成されることが示されていた。これらの熱水域でのプロセスが、大洋スケールの溶存有機物分布に及ぼす影響については評価されていなかったが、東太平洋海膨の存在する東部南太平洋深層の広範な範囲において、溶存有機物の炭素14同位体比と熱水のトレーサであるヘリウム3同位体比との間に相関関係があることが示された (Druffel et al., 2022)。この相関関係から、深海熱水系は深層における溶存有機物の(濃度は兎も角)炭素14同位体比や組成に影響を及ぼしていると考えられる。

東部太平洋において溶存黒色炭素の分布が調べられた結果、深層における溶存黒色炭素と見かけの酸素消費量の関係は、中部太平洋 (図2(b))と同様ではなかった。ここで、中部太平洋深層における溶存黒色炭素と見かけの酸素消費量の直線関係 (図2

(b))からの偏差は、溶存黒色炭素の地域的な供給や除去を示すと考えられ、その偏差は溶存黒色炭素の過剰濃度と定義された。面白いことに、東部太平洋の深層においては、溶存黒色炭素の過剰濃度と過剰ヘリウム3濃度との間に正の直線関係がみられ (図2(c))、深海熱水系において高温高圧下で生成した溶存黒色炭素が海洋深層に供給されることが明らかとなった。このことは、深海熱水噴出孔は、炭素14同位体に乏しい、熱成の安定な溶存有機物を供給していることを意味する。

海洋溶存有機物プール動態の定量的評価に向けて

海洋溶存有機物は海洋生物により生成され安定に存在すると考えられており、そのプールの挙動は地球表層の炭素循環を評価する上で考慮されてこなかった。しかし、近年の研究成果から、極めて安定な系であると考えられてきた海洋深層においても溶存有機物は除去および生成していることが示され、外来性の溶存有機物も寄与していることが示された。この除去/生成は、恐らくゆっくりとしたものであるが、莫大な海洋の体積を考えると、炭素循環の中でそれなりに大きなフラックスとなり、それらは不均衡な状態かもしれない。海洋溶存有機物プールの挙動は、多くのプロセスによって制御されている (図3)。海洋溶存有機物プールの動態を定量的に評価するには、どのような研究を展開すべきか。各プロセスに関して、観測および実験的アプローチから解明すべき点が多く残されているが、同時に数値モデル的アプローチも必須であるとする。

—参考文献—

Coppola et al. (2022) *Nat. Rev. Earth Environ.*, 3, 516-532.

Druffel et al. (2022) *Radiocarbon*, 64, 705-721.

■一般向けの関連書籍

木暮一啓 (2006) *海洋生物の連鎖—生命は海でどう循環しているか*, 東海大学出版会。



著者紹介 山下 洋平 Youhei Yamashita

北海道大学 大学院地球環境科学研究院 准教授

専門分野: 生物地球化学。非生物態有機物と炭素循環や生態系との関わりについて研究している。

略歴: 名古屋大学大学院環境科学研究科博士課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員 DC2, PD, フロリダ国際大学ポस्टドクトラルフェロー等を経て現職。