

## 深海に滞留する燃焼由来の溶存物質

～太平洋深海における溶存黒色炭素の除去プロセスを発見～

### ポイント

- ・ 森林火災や化石燃料燃焼の副産物である溶存黒色炭素が深海に普遍的に存在することを発見。
- ・ 深海の溶存黒色炭素が沈降粒子に吸着され、除去されるプロセスを発見。
- ・ 自然界に備わる二酸化炭素隔離機構の理解に大きく貢献。

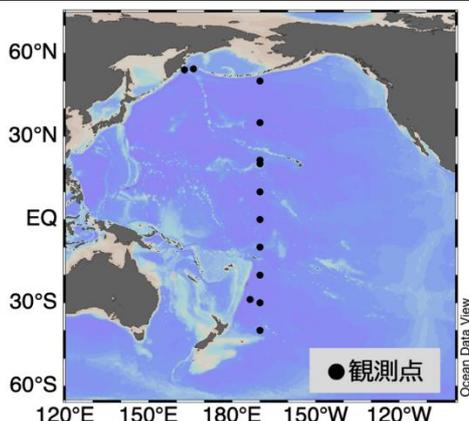
### 概要

北海道大学大学院地球環境科学研究院の山下洋平准教授と、同大学大学院環境科学院（研究当時）の中根基裕氏、森雄太郎氏、同大学低温科学研究所の西岡 純教授は、東京大学大気海洋研究所の小川浩史教授と共同で、太平洋に燃焼の副産物である溶存黒色炭素<sup>\*1</sup>が普遍的に存在すること、太平洋深海から溶存黒色炭素が除去されていることを明らかにしました。

森林火災や化石燃料燃焼に伴い不完全燃焼産物である煤や炭などの熱成炭素<sup>\*2</sup>が生成されます。熱成炭素の多くは、環境微生物による分解を受けにくく、土壌や海洋に蓄積されやすいことから、地球表層の炭素循環から二酸化炭素を隔離する機能を有すると考えられています。陸上の燃焼活動により生成された熱成炭素の一部は水と共に移動できる形態である溶存黒色炭素に変質し、河川を經由して海洋へと輸送されることが知られています。しかし、海洋へと輸送された溶存黒色炭素が、どのように分布し、どのように挙動するのかは不明でした。そこで研究グループは、南緯 40 度から北緯 54 度までの太平洋全域における観測を行い、溶存黒色炭素が太平洋に普遍的に存在すること、太平洋深海中の溶存黒色炭素の濃度は深層水循環に伴い減少することを世界で初めて明らかにしました。また、溶存黒色炭素濃度と溶存酸素濃度との関係から、沈降粒子に溶存黒色炭素が吸着され、深海から除去されることが判明しました。

本研究成果は、地球全体での熱成炭素の収支を解明する上で欠かせない成果であり、気候変動によって変わりつつある森林火災と炭素循環の関係を正しく理解する上でも貴重な知見となります。

なお、本研究成果は 2022 年 1 月 13 日（木）公開の *Nature Communications* 誌にオンライン掲載されました。



左：南大洋から北部北太平洋における観測点。右上：太平洋中央部の観測を実施した海洋研究開発機構の学術研究船白鳳丸。右下：海洋観測を行う各種センサー類と海水試料を採取する 12L のニスキン採水器。

## 【背景】

森林火災をはじめとしたバイオマス燃焼や化石燃料燃焼に伴い生成される副産物の一つに煤や炭などの熱成炭素があります。熱成炭素の主要な成分である多環芳香族化合物は環境微生物により分解されにくいため、土壌や海洋に蓄積すると考えられています。特に、森林火災では、植物が光合成により二酸化炭素から産出した有機物が熱成炭素へと変換されるため、森林火災に伴う熱成炭素の生成は大気中の二酸化炭素を隔離するプロセスに相当すると考えられます。近年の研究により、森林火災後、土壌に滞留した炭などの熱成炭素の一部は、河川へと流出し、海洋へと輸送されることが明らかとなりました。また、煤が大気に放出された後、可溶化成分へと変質し、海洋へ沈着するプロセスも示されました。これらのことは、陸上で生成された熱成炭素が海洋へと移行し蓄積していることを示唆しますが、海洋における熱成炭素の分布は明らかでなく、その挙動は解明されていませんでした。地球表層の熱成炭素の挙動は炭素循環に深く関わっているため、海洋における熱成炭素の分布を支配する要因を明らかにし、その挙動を解明することは、重要な研究テーマとなっていました。

研究グループは、熱成炭素の中でも水と共に移動することが可能な多環芳香族化合物である溶存黒色炭素に着目しました。溶存黒色炭素の分布を海洋の広い範囲で調査することで、その分布を支配する要因を解明することを試みました。

## 【研究手法】

本研究では深層水循環の時間スケール(～600年)における溶存黒色炭素の挙動を評価するために、深層水年齢の若い南太平洋から古い北部北太平洋までをカバーする4つの航海に参加し、海水試料を採取しました(p.1図)。太平洋中央部の観測は海洋研究開発機構の学術研究船白鳳丸により、西部北太平洋の観測はロシア極東海洋気象研究所との共同で、同研究所所属のマルタノフスキー号により行われました。

海水中に存在する溶存黒色炭素の濃度は極めて低いため、その分析を行う前に特殊技術により濃縮する必要があります。そこで、研究グループは、浅海から深海における海水を各10L程度採取しました。採取した海水試料に含まれる溶存黒色炭素は、船上において固層抽出法により濃縮され、陸上研究室に持ち帰りました。陸上研究室において、硝酸を用いて溶存黒色炭素をその構成成分であるベンゼンポリカルボン酸へと分解し、高速液体クロマトグラフによりベンゼンポリカルボン酸を分離および定量し、溶存黒色炭素の濃度や組成を求めました。

## 【研究成果】

これまでに海域や深さの違いによる溶存黒色炭素の存在量の違いは明らかではありませんでした。本研究により、世界で初めて広範な海域における溶存黒色炭素の分布が示された結果、溶存黒色炭素は太平洋に普遍的に存在することがわかりました。太平洋では南大洋から北部北太平洋にむけて深層水が北上します。深海における溶存黒色炭素の濃度は、深層水年齢の若い南大洋で高く、北に向かうにつれ(深層水年齢が古くなるにつれ)低くなる傾向が見られ、深層水循環に伴い溶存黒色炭素が除去されることが明らかとなりました(図1)。また、深層水循環に伴う溶存黒色炭素の組成変化から溶存黒色炭素は深海微生物に分解されないことがわかりました。さらに、深海においては溶存黒色炭素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わかりました(図2)。深海における見かけの酸素消費量は、微生物による沈降粒子の分解量と比例関係にあります。分解されずに通過する沈降粒子量とも比例関係にあると考えられます。すなわち、溶存黒色炭素の濃度と見かけの酸素消費量の間に見られた負の直線関係は、溶存黒色炭素が沈降粒子に吸着され除去された結果であることが

明らかとなりました。また、本研究結果から算出した全深海からの溶存黒色炭素の除去量は1年間あたり0.40–0.85億トン（炭素）でした。これは、地球全体の森林火災などのバイオマス燃焼に伴い年間に生成する炭の15–33%及び海洋が年間に吸収する人為起源二酸化炭素の1.5–3.3%に相当します。

### 【今後への期待】

本研究により見積もられた海洋からの溶存黒色炭素の年間除去量は、河川を通して土壌から海洋に輸送される溶存黒色炭素および大気から海洋へと輸送される溶存黒色炭素の年間供給量の合計を大きく上回ります（図3）。海洋には未知の溶存黒色炭素の供給源が存在することが考えられます。

近年、森林火災による被害が頻繁に報じられます。現在進行している地球温暖化に伴い森林火災の頻度や強度が大きくなることが予想されています。地球表層の熱成炭素の挙動に関する研究をさらに進めることにより、燃焼が炭素循環に及ぼす影響の実体が明らかになると期待されます。

### 【謝辞】

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(課題番号 JP16H02930; JP19H04249; JP19H05667; JP19H04260)の助成を受けて実施されました。

### 論文情報

論文名	Fate of dissolved black carbon in the deep Pacific Ocean (太平洋深海に存在する溶存黒色炭素の行方)
著者名	山下洋平 <sup>1,2</sup> , 中根基裕 <sup>2</sup> , 森雄太郎 <sup>2</sup> , 西岡 純 <sup>3,2</sup> , 小川浩史 <sup>4</sup> (1北海道大学大学院地球環境科学研究院, 2北海道大学大学院環境科学院, 3北海道大学低温科学研究所, 4東京大学大気海洋研究所)
雑誌名	Nature Communications
DOI	s41598-020-61375-7
公表日	2022年1月13日(木)(オンライン公開)

### お問い合わせ先

北海道大学大学院地球環境科学研究院 准教授 山下洋平 (やましたようへい)

T E L 011-706-2349 メール yamashiy@ees.hokudai.ac.jp

U R L <https://pablos.ees.hokudai.ac.jp/yamashita/>

### 配信元

北海道大学総務企画部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

東京大学大気海洋研究所広報室 (〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

メール kouhou@aori.u-tokyo.ac.jp

### 【用語解説】

\*1 溶存黒色炭素 …… 熱成炭素の中で水と共に移動可能な多環芳香族化合物のこと。

\*2 熱成炭素 …… 森林火災や化石燃料を燃焼時の酸素不足による不完全燃焼に伴い形成される煤や炭などの炭素に富んだ物質のこと。

【参考図】

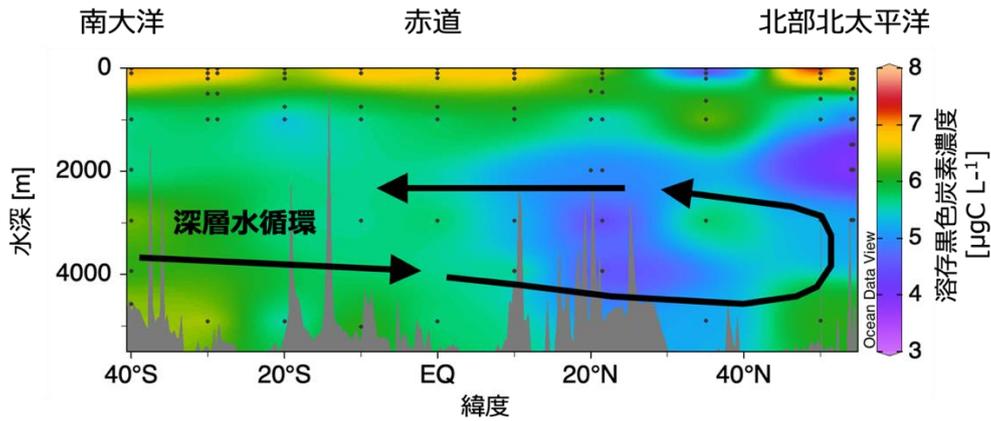


図 1.海水中の溶存黒色炭素濃度の分布。黒い矢印は深層水循環の経路を示す。

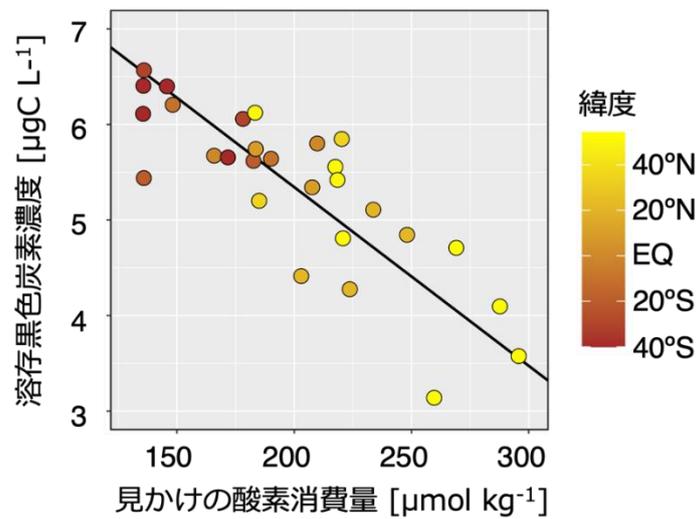


図 2.太平洋深海における溶存黒色炭素濃度と見かけの酸素消費量の関係。黒線は両者の間の直線関係を示す。

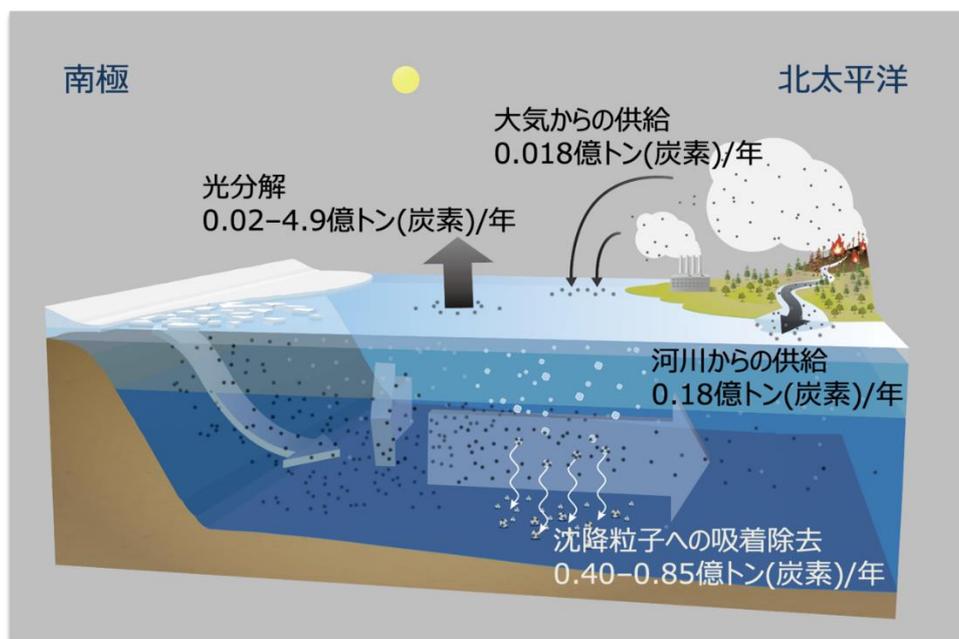


図 3.海洋の溶存黒色炭素の供給と除去のバランス