

過去 150 万年間の大気中二酸化炭素濃度を解明

ポイント

- ・海底堆積物の分析により、過去 150 万年間の大気中二酸化炭素濃度の変動を復元。
- ・従来のアイスコア分析にもとづく過去 80 万年間の変動記録を約 2 倍に延長。
- ・二酸化炭素の気候変動における役割の解明に役立つ成果。

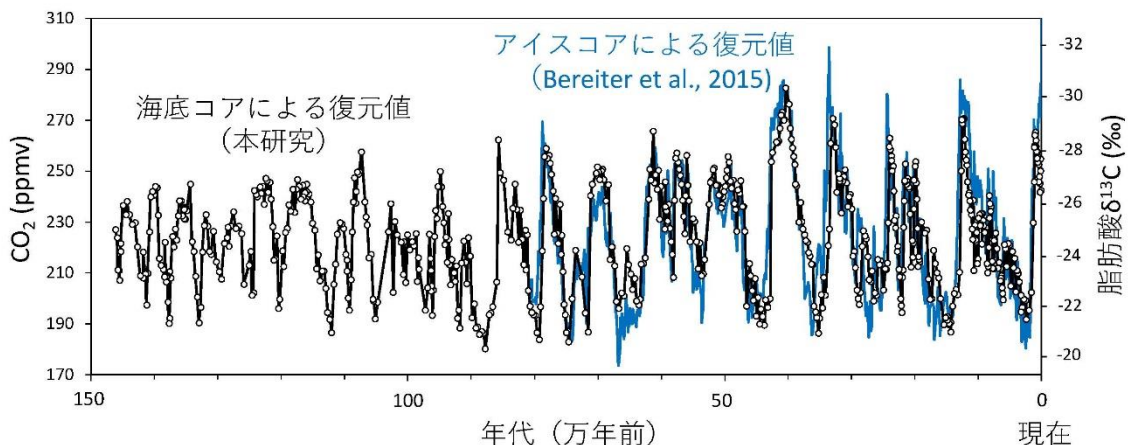
概要

北海道大学大学院地球環境科学研究院の山本正伸教授、同大学低温科学研究所の関 宰准教授、同大学環境科学院修士課程（研究当時）の土屋優子氏、東京大学大気海洋研究所の大石龍太特任研究員、阿部彩子教授の研究グループは、ベンガル湾堆積物に含まれる植物起源脂肪酸の炭素同位体比^{*1}が過去の大気中二酸化炭素変動を表していることに気がつき、新手法として提案するとともに、過去 150 万年間の大気中二酸化炭素濃度の変動を明らかにしました。

大気中二酸化炭素は地球の気候を決定する重要因子です。将来の温暖化を予測するうえで、二酸化炭素が過去の気候変動にどのように影響したのか、詳細に解明することが必要です。これまで過去の二酸化炭素濃度は、南極の氷を掘削して得られたアイスコアに含まれるガスを分析することで明らかにされてきました。研究グループは、ベンガル湾堆積物に含まれる植物起源脂肪酸の炭素同位体比が、過去の大気中二酸化炭素変動を表していることを、アイスコアの二酸化炭素濃度を比較によって示しました。そしてその関係を利用し、80 万年以前の大気中二酸化炭素濃度変動を、初めて高精度・高時間解像度で明らかにしました。

本研究の結果、80 万年前以前でも二酸化炭素濃度が陸上氷床体積にほぼ同調して変動していたことが明らかになりました。しかし、予想外に 100 万年前よりも前の温暖だった時代で CO₂ 濃度は決して高くはなかったことがわかりました。また、100 万年前よりも前の時代では、二酸化炭素が陸上氷床よりも早く変動していたのに対し、80 万年前より後の時代では陸上氷床が二酸化炭素よりも早く変動していたこともわかりました。

なお、本研究成果は、2022 年 4 月 1 日（金）公開の *Nature Geoscience* 誌にオンライン掲載されました。



過去 150 万年間の大気中二酸化炭素濃度

【背景】

二酸化炭素（CO₂）は温室効果*²をもたらす気体であり、その大気中の存在量は地球の気候を決定する重要因子です。現在、化石燃料の使用により発生したCO₂が大気中に放出されて残留し、温室効果が高まることで温暖化が進行しています。CO₂の増加が、将来、地球の気候にどのような変化をもたらすのか注目されています。この温暖化の行く末を予測するうえで、CO₂が過去の気候変動にどのように影響したのか詳細に解明してゆくことが非常に重要です。

これまで過去のCO₂濃度は南極の氷を掘削して得られたアイスコアに含まれるガスを分析することにより明らかにされてきました。今も世界各国が競って、古い氷の探索を進めていますが、現状では80万年前までが限度です。一方で、海底堆積物を用いてCO₂濃度を推定する手法もいくつか提案されていますが、推定誤差が大きく、気候変動との関係を議論するには不十分な状況でした。

【研究手法】

研究チームは、南アジアのモンスーン降雨変動を調べる目的で、インド東部のベンガル湾で採取した海底堆積物コアに含まれている植物起源の有機化合物で脂肪酸*³の炭素同位体比を調べていました（図1）。陸上植物にはC3植物とC4植物*⁴があり、同位体比が異なるので、同位体比からインド東部のC3植物とC4植物の被覆率の変化がわかり、そこから過去の降雨量がわかるのではないかと考えたからです。ところが得られた結果によると、脂肪酸の炭素同位体比は降雨量ではなく、アイスコアに記録されている大気中CO₂濃度と一致した変動を示すことがわかりました。もし脂肪酸の炭素同位体比がCO₂濃度を表しているならば、堆積物を分析することで、80万年前より前の時代のCO₂濃度を復元できるかもしれないと考えました。

【研究成果】

まず過去80万年間のアイスコアCO₂濃度と脂肪酸炭素同位体比を比較してみたところ、非常に良い一致がみられました（図2）。一方で、他の気候要素との一致は芳しくありませんでした。脂肪酸炭素同位体比がC3植物とC4植物の被覆率を反映しているとして、なぜCO₂濃度のみを強く反映するのか謎でした。C4植物が二酸化炭素の少ない条件でC3植物よりも有利であることは植物生理学的には良くわかっている事実ですが、実際に二酸化炭素がC3・C4植生に影響したかどうかは検討が十分ではありませんでした。そこで研究チームでは、大型計算機で仮想の地球環境を再現し、CO₂濃度、降雨量、温度を変化させたとき、地表の植生がどのように変化するかを何度も繰り返して調べました。その結果、インド東部のようなサバナ植生では、C3・C4植生は降雨量や温度ではなく、CO₂濃度に敏感に応じて変化することがわかりました。

また、研究チームでは、堆積物の分析を進め、過去150万年間のCO₂濃度を復元しました。得られた結果をみると、予想通りだったことと予想外だったことがありました。予想通りだったのは、CO₂濃度が陸上氷床の大きさとはほぼ同調して変動していたことです。陸上氷床の大きさは、地球の公転軌道の離心率の周期的変化（10万年周期）、自転軸の傾きの周期的変化（4万年周期）、自転軸の歳差運動（2万年周期）に支配されている日射量変動に対応して周期的に変動しており、100万年前より以前には4万年周期が強く、80万年前より以降では10万年周期が強いのですが、CO₂濃度もそれに対応するように周期が変化したことが示されました（p.1図）。予想外だったのは、100万年前より前の温暖だった時代でCO₂濃度は決して高くはなかったことです。この原因は不明で、解明は今後の課題です。また、100万年前より前の時代では、CO₂が陸上氷床よりも早いタイミングで変動していたのに対して、80万年前より後の時代では陸上氷床がCO₂よりも早いタイミングで変動してい

たことがわかりました。この発見は、氷床と CO₂ の間の関係が 80-100 万年前を境に変化したことを意味しており、その具体的なメカニズムの解明が今後の大きな課題になりました。

【今後への期待】

過去 150 万年間の CO₂ 濃度を復元し、CO₂ と大陸氷床の関係が時代により異なることが明らかになりました。CO₂ は大気、海洋、陸面、雪氷の物理条件に影響しますが、後者もまた CO₂ に影響しており、その相互作用により気候変動が生じます。その相互作用がどのようなものなのか明らかにできる手がかりが本研究により得られました。また、本研究で用いた手法を用いて、さらに古い時代の CO₂ 濃度が復元されることも大いに期待されます。

【謝辞】

本研究は、国際深海掘削計画 (International Ocean Discovery Program)、日本学術振興会 (JPMXS05R2900001, 19H05595, 17H06104, 17H06323)、独立研究法人海洋開発機構 Exp 353 航海後研究および地球シミュレーター、米国国立科学財団 (OCE1634774)、文部科学省北極域研究 (ArCS JPMXD1300000000) の支援を受けて実施されました。

論文情報

論文名	Increased interglacial atmospheric CO ₂ levels followed the mid-Pleistocene Transition (堆積物中の葉ワックスから得られた過去 146 万年間の大気中二酸化炭素濃度の記録)
著者名	山本正伸 ¹ , スティーブ・C・クレメンズ ² , 関 宰 ³ , 土屋優子 ⁴ (研究当時), ヨンソン・ファン ² , 大石龍太 ⁵ , 阿部彩子 ⁵ (¹ 北海道大学大学院地球環境科学研究院, ² ブラウン大学, ³ 北海道大学低温科学研究所, ⁴ 北海道大学大学院環境科学院, ⁵ 東京大学大気海洋研究所)
雑誌名	Nature Geoscience (地球科学の専門誌)
DOI	10.1038/s41561-022-00918-1
公表日	2022 年 4 月 1 日 (金) (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 教授 山本正伸 (やまもとまさのぶ)

T E L 011-706-2379 F A X 011-706-4867 メール myama@ees.hokudai.ac.jp

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

東京大学大気海洋研究所 教授 阿部彩子 (あべあやこ)

T E L 04-7136-4406 F A X 04-7136-4375 メール abeouchi@aori.u-tokyo.ac.jp

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

【参考図】

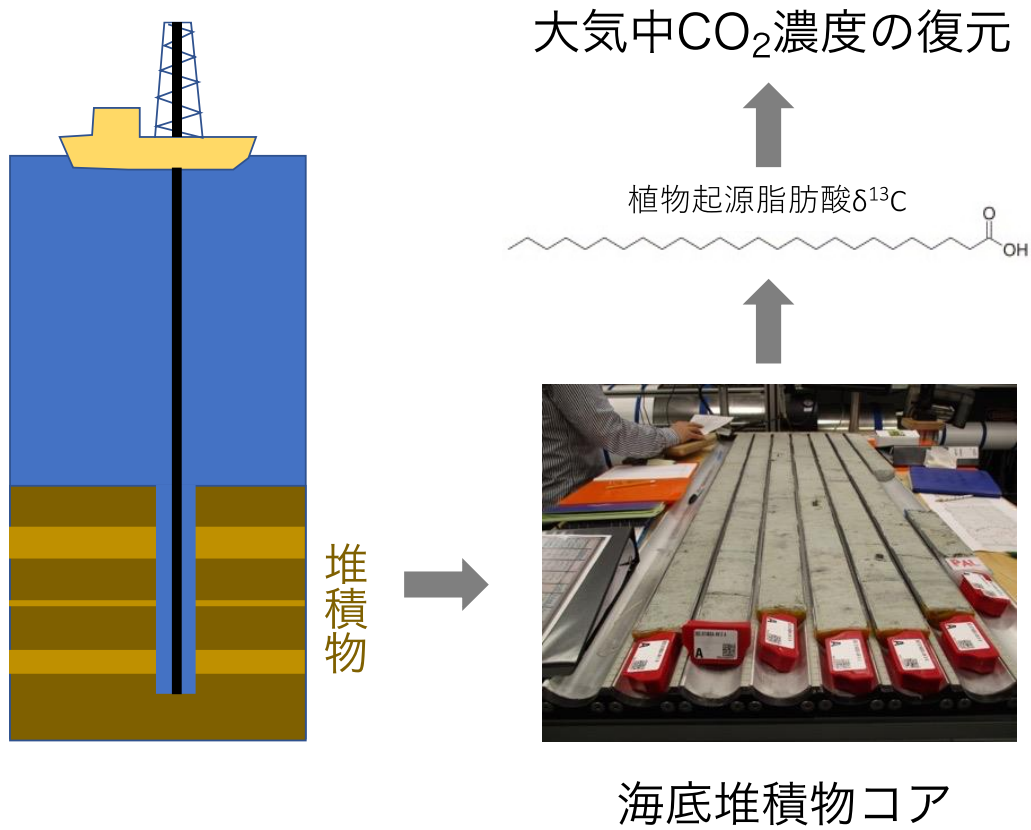


図 1. 海底掘削と海底堆積物コア

ベンガル湾の海底を掘削し、堆積物コアを採取。採取したコアについて分析を行い、植物起源脂肪酸の炭素同位体比を測定し、過去の大気中二酸化炭素濃度を復元した。

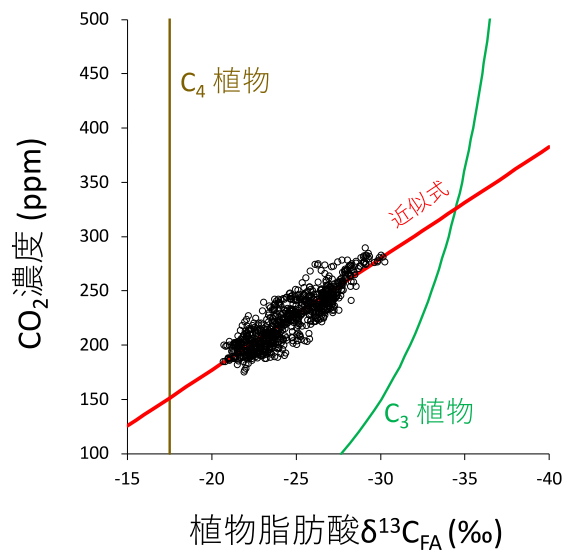


図 2. ベンガル湾堆積物中の植物脂肪酸炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{FA}}$) と同時代のアイスコア CO₂ 濃度の関係
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{FA}}$ に基づく CO₂ 復元値の較正誤差 (二乗平均平方根誤差) は、1ppm の解析誤差を含めて 12ppm だった。CO₂ 濃度の推定値の上限は、C₃ 植物が 100% になったときの 325ppm、下限は C₃ 植物が 0% になったときの 151ppm となる。

【用語解説】

- *1 炭素同位体比 … 炭素は質量数 12 と 13 の安定同位体比をもつ。
- *2 温室効果 … 地表から発せられる放射（エネルギー）が、大気圏外に届く前にその一部が大気中の物質に吸収されることで、そのエネルギーが大気圏より内側に滞留し、結果として大気圏内部の気温が上昇する現象。
- *3 脂肪酸 … 直鎖カルボン酸のこと。炭素数 26 以上の脂肪酸は陸上高等植物の葉の表面を覆うワックスとなる。
- *4 C3 植物と C4 植物 … C3 植物は、葉肉細胞で酵素を用いた光合成により、CO₂ から炭素を固定する。同時に、酵素は酸素を固定し、光呼吸によって炭素を失う。低 CO₂ 環境では、C3 植物の光合成は光呼吸に比べ抑制される。C4 植物は、葉肉細胞中で CO₂ を C4 ジカルボン酸に変換し、維管束鞘細胞に移動させ、酵素を用いて再変換された CO₂ を固定する。維管束鞘細胞内は酸素濃度が低いいため、酵素は効率よく炭素を固定できる。このような仕組みにより、C4 植物は低 CO₂ 環境において C3 植物よりも優位に立つことができる。