



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

千葉工業大学
CHIBA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



高知大学
Kochi University



国立研究開発法人

海洋研究開発機構

過去の「超温暖化」を終息させたメカニズムの痕跡を インド洋の深海堆積物から発見

1. 発表者： 安川 和孝（東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 助教／
千葉工業大学次世代海洋資源研究センター 招聘研究員）
加藤 泰浩（東京大学大学院工学系研究科 エネルギー・資源フロンティア
センター／システム創成学専攻 教授／
千葉工業大学次世代海洋資源研究センター 所長／
海洋研究開発機構（JAMSTEC）招聘上席研究員）

2. 発表のポイント：

- ◆約 5,600～5,200 万年前に繰り返し発生した急激かつ短期的な地球温暖化イベントの詳細な記録を、世界で初めてインド洋の深海堆積物から復元しました。
- ◆海洋の生物生産が増大して大気-海洋系から余分な二酸化炭素を除去することで温暖化が終息したことを、地球科学とデータ科学の融合的アプローチにより明らかにしました。
- ◆本研究の成果は、人類活動に起因する大量の温室効果ガス放出に対して、地球システムがどのように応答するかを数万年以上の長期スケールで予測する上で重要な知見となります。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の安川和孝助教、加藤泰浩教授、中村謙太郎准教授、千葉工業大学次世代海洋資源研究センターの藤永公一郎上席研究員と高知大学海洋コア総合研究センターの池原実教授の研究グループは、前期始新世（注1）にあたる約 5,600～5,200 万年前に繰り返し発生した急激かつ短期的な地球温暖化イベントの詳細な記録を、世界で初めてインド洋の深海堆積物から復元しました。さらに、それらの化学組成データを統計的に解析し、当時の堆積物を構成する複数の独立な成分を分離・抽出しました。その結果、前期始新世の複数の温暖化イベントにおいて、海洋表層の生物生産が増大して大気-海洋系から余剰な二酸化炭素を除去する「地球システムの負のフィードバック」（注2）と呼ばれるメカニズムが機能し、温暖化を終息させていたことが明らかとなりました。本研究の成果は、人類活動により放出された大量の温室効果ガス（注3）がグローバルな環境や物質循環にどのような影響を与え、どのようにして元の状態へ回復していくのかを、数万年以上の長期スケールで予測する上で重要な知見となります。

4. 発表内容：

今から約 5,600～5,200 万年前の前期始新世は、恐竜が絶滅した約 6,600 万年前から現在までの新生代の中で、最も温暖な時代でした。この温暖なバックグラウンドの気候に加えて、さらなる温度上昇を伴う「Hyperthermals（超温暖化）」（注4）と呼ばれる、急激かつ短期的な地球温暖化イベントが繰り返し発生していたことが知られています。これらの「超温暖化」イベントは、大量の温室効果ガスが大気-海洋系に放出されたために生じたと考えられていることから、人類が現在放出している大量の二酸化炭素によって将来的に何が起こるかを知るための、地球そのものを用いた壮大なケーススタディとも捉えることができます。

こうした前期始新世の「超温暖化」イベントの痕跡は、最近 15 年くらいの間に、太平洋や大西洋、北極海、オセアニア、ヨーロッパ、北アメリカなど、世界各地から次々と報告されています。しかしながら、世界第 3 位の面積を持つ大洋であるにも関わらず、インド洋における明瞭な記録はほとんど報告されておらず、インド洋は前期始新世の「超温暖化」に関して巨大な情報の空白域となっていました。

そこで本研究グループは、国立研究開発法人海洋研究開発機構高知コア研究所（注 5）に保管されている、インド洋で過去に掘削された深海堆積物コアから試料を採取し、化学分析を行いました。分析には、高知大学海洋コア総合研究センターの安定同位体質量分析計および炭酸塩分析装置ならびに東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンターの蛍光 X 線分析装置および誘導結合プラズマ質量分析装置を用いました。その結果、「超温暖化」イベントを示す複数の炭素同位体比の異常（注 6）が確認され、世界で初めてインド洋における「超温暖化」の痕跡を高時間解像度で復元することに成功しました。これにより、前期始新世における一連の「超温暖化」イベントが全地球的な環境変動であったことが確実に became ました。

本研究グループはさらに、本研究で得られた炭素の安定同位体比と 29 種類の元素含有量から成る 30 次元の地球化学データセットを、独立成分分析（注 7）という多変量解析手法で解析しました。その結果、データが持つ全情報量の 84% が、統計的に独立している 4 つの成分：生物源炭酸カルシウム（石灰質プランクトンの殻）、生物源リン酸カルシウム（魚類などの歯や骨片）、海洋表層の石灰質プランクトン群集の変化または堆積後の続成過程の影響、生物源バライト（硫酸バリウム）で説明されることが分かりました。

これらのうち、生物源バライトの堆積は、「超温暖化」イベント時の炭素同位体比異常と連動して増加していました。大気-海洋系の二酸化炭素は、海洋表層で光合成をする生物（プランクトン）によって有機物に変換され、深海へ運ばれます。その過程で有機物の一部は分解されますが、その際にバライトが生成し、海底へ沈降していきます。したがって、海底堆積物へのバライトの沈積量が増加することは、海洋における有機物の生産と深海への輸送、すなわち輸送生産性の増大を意味します。このことから、本研究で抽出した生物源バライトに関連する成分は、海洋の輸送生産性の増大が大気-海洋系内の余分な二酸化炭素を除去することで、温暖化状態から元の状態へと地球の気候を回復させる「負のフィードバック」を表していると考えられます。このフィードバックは、最も深刻な「超温暖化」であった約 5,600 万年前の暁新世/始新世境界温暖化極大（PETM）（注 8）で機能したことが先行研究により知られていましたが、より小規模な他の複数の「超温暖化」イベントにおいても同様に機能した普遍的なメカニズムであることが、本研究により初めて明らかとなりました。

人類が現在放出している膨大な量の温室効果ガスが地球環境にどのような影響を与えるのかについては、数値シミュレーションによる研究が盛んに行われています。しかしながら、数万年以上の長期的時間スケールで正確に予測することは難しく、過去の地球環境変動の記録が重要なヒントとなります。本研究の成果は、急激な温暖化の発生に対して、その規模によらず海洋生物生産フィードバックが温暖化の終息に寄与することを示唆しており、将来の気候変動の長期的影響を予測する上で重要な知見となります（ただし、元々温暖な気候である前期始新世と、両極に氷床が存在する寒冷な気候である現在では、基準となる気候システムの状態が異なるため、フィードバックの働き方が異なる可能性があるという点に留意する必要があります）。

今後、地球システムに内在するこうした負のフィードバックの機能するタイミングや、回復にかかる時間スケールをより詳細に明らかにすることで、地質学的時間スケール（数万年以上）と人類社会の時間スケール（数千年以下）のギャップを埋め、気候変動という現象についての本質的な理解が進むとともに、その影響を予測する精度の向上につながると期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Scientific Reports」9月12日版

論文タイトル：Earth system feedback statistically extracted from the Indian Ocean deep-sea sediments recording Eocene hyperthermals

著者：安川和孝^{1,2*}、中村謙太郎¹、藤永公一郎^{2,3}、池原実⁴、加藤泰浩^{3,1,2,5*}

¹ 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻、² 千葉工業大学次世代海洋資源研究センター、³ 東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター、⁴ 高知大学海洋コア総合研究センター、⁵ 海洋研究開発機構海底資源研究開発センター

DOI 番号：10.1038/s41598-017-11470-z (SREP-17-21218-T)

アブストラクト URL：www.nature.com/articles/s41598-017-11470-z

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻
助教 安川 和孝 (やすかわ かずたか)

東京大学大学院工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター／システム創成学専攻
教授 加藤 泰浩 (かとう やすひろ)

7. 用語解説：

(注1) 始新世：

現在から5,600万年前～3,390万年前の期間を指す。前期始新世は5,600万年前～4,780万年前までの期間にあたり、北極や南極にも永続的な氷床が存在しない、温暖な気候であった。現在のカナダ北極圏にある当時の地層からは、温帯林の樹木やワニの化石が見つかっている。本研究で対象としたのは、前期始新世のうち約5,600万年前から5,200万年前に堆積した深海堆積物である。

(注2) 負のフィードバック：

構成要素同士が相互に影響する1つのシステム内において、ある要素が変化を起こした時に、他の要素との相互作用がその変化による影響を抑制し、系を元の安定な状態に戻す働きのこと。本研究の場合、大気中の二酸化炭素濃度が急激に増えて温暖化が起こった時、生物生産が増えて二酸化炭素を消費したため、大気中の二酸化炭素濃度が下がり、温暖化が終息したと考えられる。

(注3) 温室効果ガス：

地球から宇宙へ出ていく放射をトラップし、その一部を地表に向けて再放射する性質を持った気体。現在の人類が放出している温室効果ガスには、二酸化炭素の他にメタンなどがある。前期始新世をはじめとする過去の地球温暖化の幾つかについては、永久凍土の融解や海底のメタンハイドレートの分解によって放出されたメタンガスが原因の1つと考えられているが、大気中に放出されたメタンは数十年程度で酸化され、二酸化炭素となって温暖化に寄与したと考えられている。

(注4) Hyperthermals (超温暖化)：

後期暁新世（始新世の1つ前の時代）から前期始新世にかけての長期的な温暖化傾向に加えて発生した、急激かつ短期的な地球温暖化イベントの総称。もともと、1991年に発見された暁新世／始新世境界温暖化極大（PETM；注8参照）がよく知られていた。その後2000年代になって、PETMによく似た特徴を持つがPETMよりも規模の小さい温暖化イベントが、前期始新世に繰り返し起こっていたことが明らかになってきた。比較的新しい地質学用語であり、日本語訳された文献がほとんど存在しないため、ここでは便宜上「超温暖化」と訳を当てている（イベント発生前の状態が既に、現在の地球よりもはるかに（恐らく10℃以上）温暖であったことから）。

（注5）海洋研究開発機構高知コア研究所：

国際深海科学掘削計画（International Ocean Discovery Program, IODP）およびその前身の深海掘削計画で採取された深海ボーリングコア試料を保管・管理している。世界に3箇所あるIODPコア保管拠点の1つ（残り2つはアメリカ合衆国のテキサスA&M大学とドイツのブレーメン大学）。全国共同利用型研究施設として様々な分析機器を管理する高知大学海洋コア総合研究センターと合わせて「高知コアセンター」を構成している。本研究は、海洋研究開発機構高知コア研究所の協力の下にIODPが所有するコア試料の提供を受け、全国共同利用制度を利用して高知大学海洋コア総合研究センターにおいて分析を行った。

（注6）炭素同位体比の異常：

自然界に存在する炭素には、化学的性質は同じだが質量数の異なる ^{12}C と ^{13}C があり、物質によってそれらの含まれる比率が異なっている。例えば、生物は光合成の際に軽い ^{12}C の方を優先的に取り込む性質があるため、有機物の炭素同位体比（ $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）は海水などと比べて相対的に小さな値を取る。前期始新世の「超温暖化」イベントでは、炭素同位体比が急激に低下する「負の異常」が起こった。これは、小さな炭素同位体比の値を持つ温室効果ガスが大気-海洋系に大量に供給されたことで、海水や海水中で生きるプランクトンの殻などの炭素同位体比が全地球的に低下したことを意味すると一般に考えられている。

（注7）独立成分分析：

脳科学分野や情報科学分野で1990年代以降広く用いられるようになった、信号解析手法の1つ。データ構造に内在する「非正規性」を利用して、観測された信号のみから元の起源信号とそれらの混合プロセスを同時に推定することができる。独立成分分析の応用範囲は極めて広く、画像の圧縮や雑音除去、脳波や脳磁図の信号分離、通信時の干渉電波の分離、金融時系列データの解析など、分野を超えて多岐に渡っている。

（注8）暁新世／始新世境界温暖化極大（PETM）：

現在から約5,600万年前の暁新世と始新世の境界において発生した、急激な地球温暖化イベント。英語名のPaleocene-Eocene Thermal Maximumを略してPETMと呼ばれる。PETMでは、数千年以内で全球平均気温が5℃から9℃上昇したと考えられている。また、温暖化に伴って炭素同位体比が急激に低下すると共に、深海底に堆積した炭酸塩が溶解した。これは、炭素同位体比の値が小さい二酸化炭素が大量に大気-海洋系へ放出され、それらが海水に溶けて、海洋酸性化が起こったことを示している。PETMの原因は完全には分かっていないが、海底のメタンハイドレートが大規模に崩壊して温室効果ガスが大量に放出されたためとする説がある。

8. 添付資料：

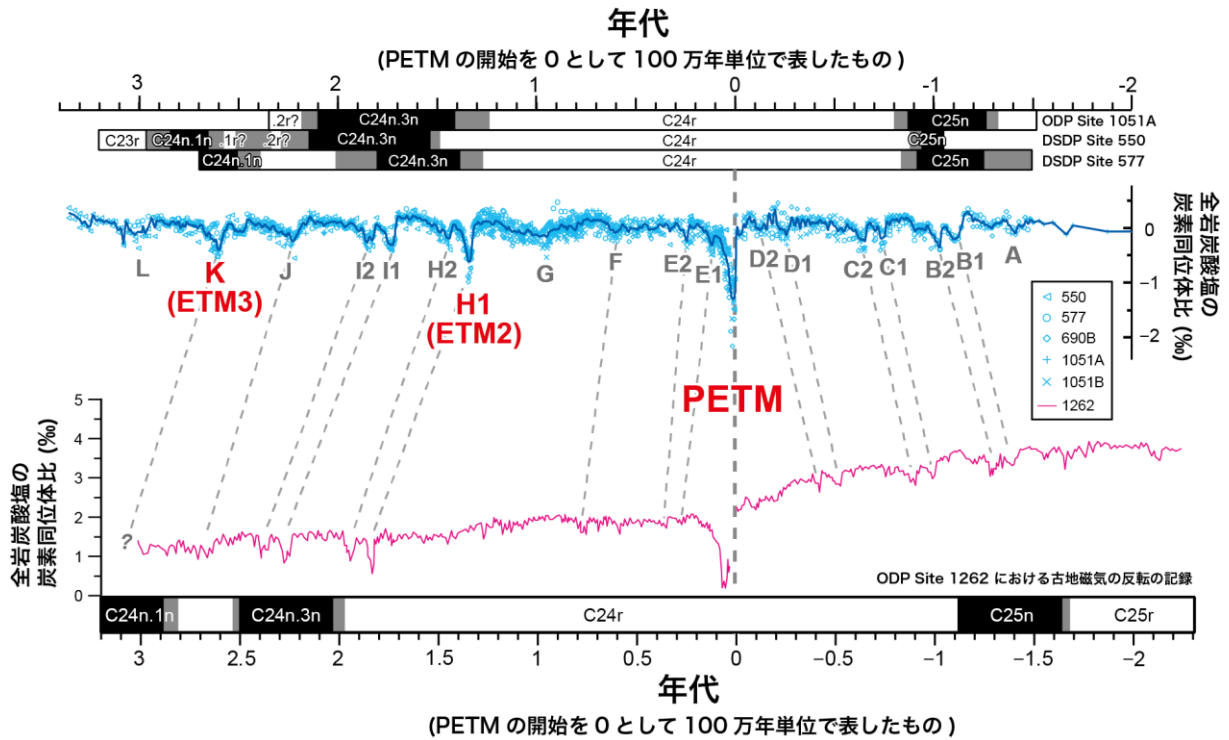


図1 暁新世末から前期始新世にかけての「超温暖化」イベントの記録
 短期的な温室効果ガスの放出に伴う炭素同位体比の負の異常（ピーク）が複数見られ、先行研究（Cramer et al., 2003）によってAからLまで記号がつけられている。青で示したデータ（Cramer et al., 2003）とピンクで示したデータ（Zachos et al., 2010）では年代推定に用いたモデルが異なるため、横軸の年代値が異なる。また、青で示したデータは出典元の論文（Cramer et al., 2003）において長期的な傾向が除去されている点に注意。

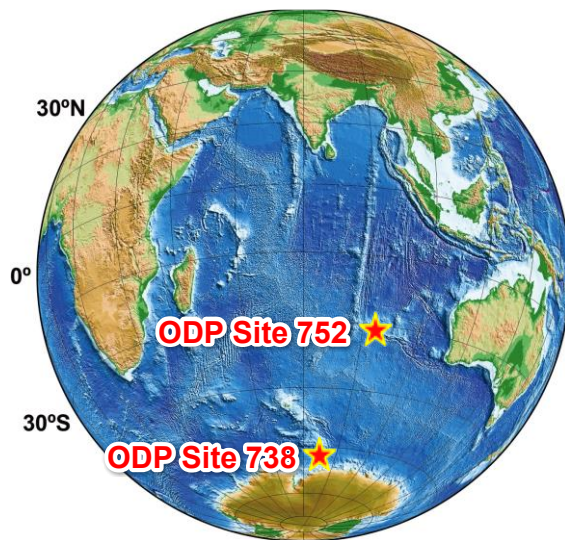


図2 本研究で用いた試料の採取地点

南東インド洋にあるブローケン海嶺で掘削された Ocean Drilling Program (ODP) Site 752 および南大洋インド洋セクターにあるケルゲレン海台で掘削された ODP Site 738。いずれも、高知大学物部キャンパス内にある高知コアセンターに保管されている。

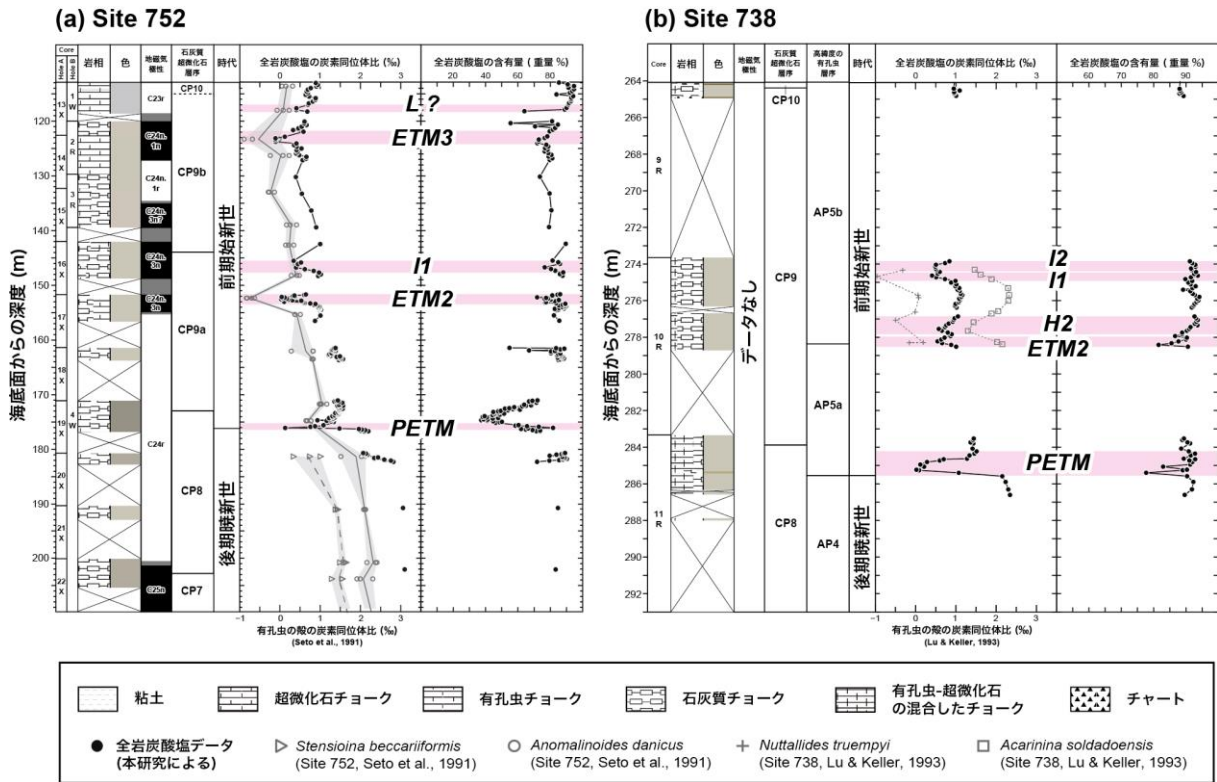


図3 研究対象とした堆積物コアと、本研究で得られた炭素同位体比および炭酸塩含有量のデータ2つのサイトから合計249試料を採取・分析した。

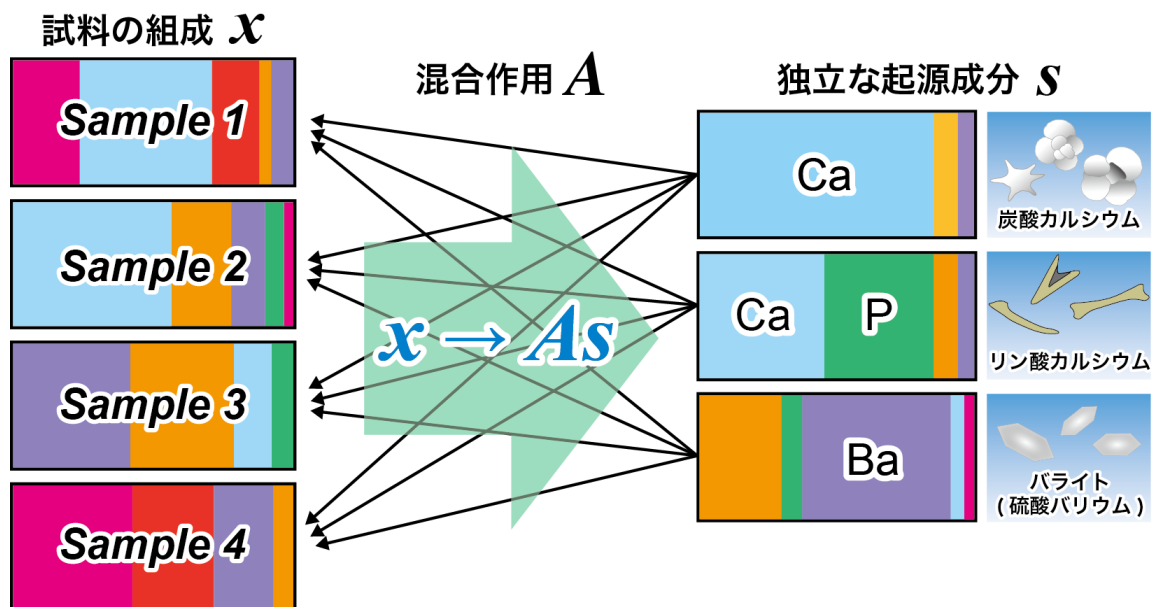


図4 深海堆積物の化学組成データに対する独立成分分析の概念図

試料の化学組成データ (x) に内在する「非正規性」という統計学的性質を利用して、観測可能な x から、独立な起源成分 (s) と未知の混合作用 (A) の両方を同時に推定できる。

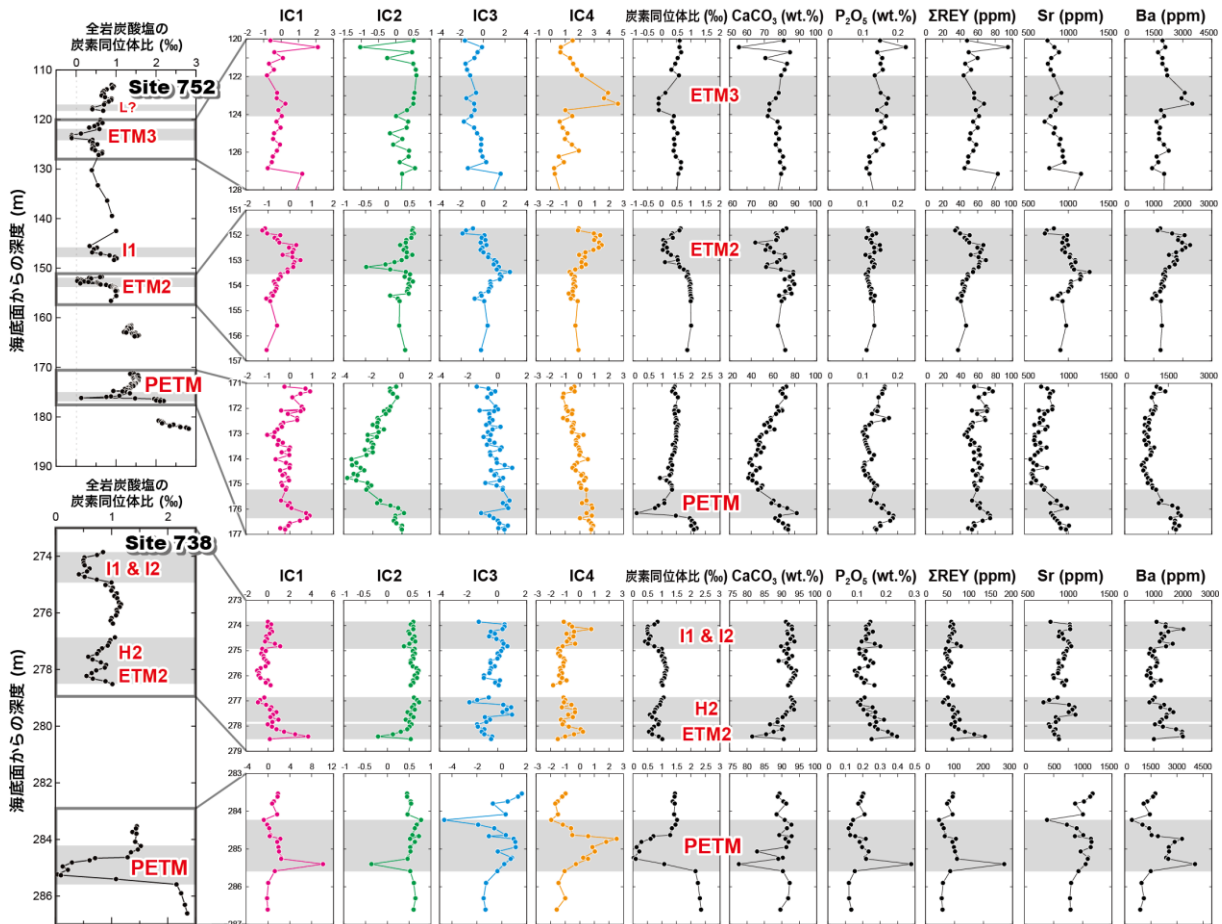


図5 本研究における独立成分分析の結果

29種類の元素濃度と炭素同位体比を合わせた30次元の地球化学データセットから、4つの独立成分を抽出した。IC1は生物源リン酸カルシウム、IC2は生物源炭酸カルシウム、IC3は海洋表層の石灰質プランクトン群集の変化または堆積後の続成過程の影響、IC4は生物源バライトの堆積と炭素同位体比の変化をそれぞれ表す独立成分。それぞれの独立成分と関連の強い元素濃度および炭素同位体比のプロファイルを併せて示す。生物生産フィードバックを表すIC4は、温暖化イベントを示す炭素同位体比ピークに連動して増大する。Site 752のPETMでのみ、IC4に変化が見られないのは、この層準に多量に混入している火山灰が影響した可能性が考えられる。

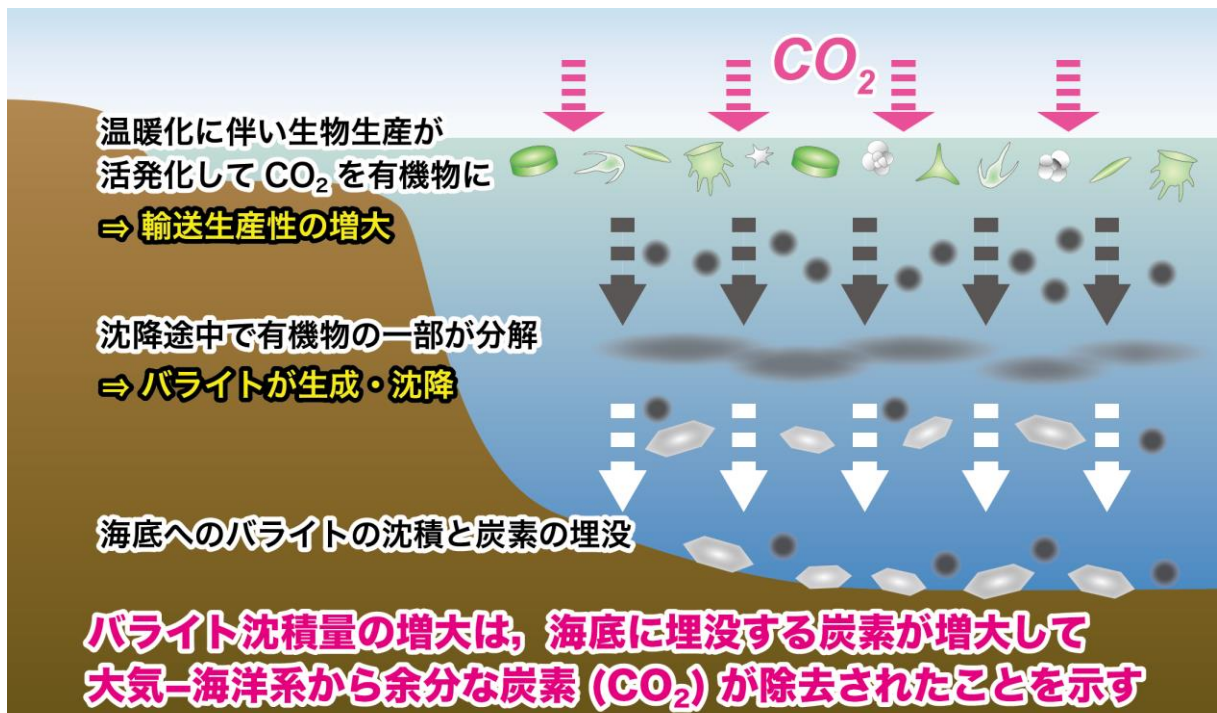


図6 海洋生物生産フィードバックの概念図

温暖期に海洋表層のプランクトンによる光合成が活発になり、大気-海洋表層の二酸化炭素が有機物となって海底へ沈降する（輸送生産性の増大）。有機物の一部は途中で分解され、バライトが生じる。そのため、輸送生産性が増大すると海底堆積物中に埋没する炭素とバライトが増える。これにより、大気-海洋系から余分な炭素（温室効果ガス）が効率的に除去され、大気中の温室効果ガスの濃度が低下して、温暖化状態から元の状態へと戻っていく。