全球凍結と大酸化イベントをつなぐ証拠

地球はこれまでに少なくとも3度、全球が凍結する事態を経験したことがわかってきた。さらに、その全球凍結直後に大気中の酸素が大量に増える出来事（イベント）が起きたことも明らかになり、両者の因果関係に注目が集まっている。田近英一博士らは、2つのイベントをつなぐ具体的証拠を突き止め、生命進化の謎に迫る成果をもたらした。

全球凍結仮説の登場

――Nature ダイジェスト：全球凍結について、どのようなことがわかっていたのでしょう？

田近：これまで知られている全球凍結はいずれも原生代（25億年前～5億4200万年前）の出来事で、約22億年前、7億年前、6億年前に生じました。地球で生命がはぐくまれたのは「穏やかな環境が維持されてきたため」とされますが、一方では、このような劇的な現象も起きていたのです。私たちは、こうした地球環境の安定性と不安定性の両方が、生命進化に重要だったと考えており、不安定性の具体的事例として全球凍結について研究してきました。

全球が凍結したとする「スノーボールアース仮説」を初めて提唱したのは、カルフォルニア工科大のジョセフ・カーシュビンク博士です。博士は、オーストラリアに露出する約6億年前の地層に「氷床が存在した証拠となる堆積物（氷河性堆積物）」があることを突き止め、その地域が当時は低緯度にあったことを証明したうえで、1992年に全球凍結仮説を提唱しました。その後、カーシュビンク博士は東大の教授を務めた時期もあり、2002年からは、私が研究代表者を務める「スノーボールアースに関する海外学術調査プロジェクト」に共同研究者として参加していただいています。

今回は、約22億年前の全球凍結がその後の大酸化イベントと密接な関係にあるのではないかとの仮説を立て、それについて調べようということになりました。

――一方の大酸化イベントについては、何がわかっていたのでしょう？

「大酸化イベント」とは、約22億年前に大気中の酸素の量が急激に増えた現象のことで、昔から多くの研究がなされてきました。酸素は地表では熱力学的に不安定なため、無機的な反応ではほとんど生成されません。したがって、酸素を発生する要因は「生物による光合成」に限定されると考えられます。光合成では、炭素の2つの安定同位体（^{12}Cと^{13}C）のうち、軽い^{12}Cがより多く使われることが知られています。つまり、光合成が盛んだと^{12}Cが消費され、環境中には^{13}Cの割合が多くなります（炭素同位体比の「正異常」という）。

したがって、過去の堆積物中の炭素同位体比が「正異常」を示せば、その時期に光合成による大量の酸素供給が行われたと推測できます。実際、約22億～21億年前に大規模な「正異常」が起きたことがわかり、大酸化イベントと名付けられたわけです。研究者の多くは、この大酸化イベントによる大気中の酸素濃度の増加が、その後の真核生物の出現につながったと考えています。

一方、前述のカーシュビンク博士は、南アフリカの約22億年前の氷河性堆積物の上に、地球史上初めてとなる二酸化マンガンによる「マンガン鉱床」が形成されていることにも注目していました。そして、マンガンは酸化還元電位が非常に高い物質で、その酸化は分子状の酸素によってのみ可能なことから、大酸化イベントが全球凍結の直後に生じたのではないかと解釈しました。以上のことは、約22億年前の全球凍結の直後に大酸化イベントが起きたことを強力に示唆していますが、両者の因果関係は謎のままでした。

図1. 左の写真は、米国ミシガン州における地質調査風景。足下に露出している地層はクォーツァイト層。右の写真は、カナダ・オンタリオ州でみられる氷河性堆積物。「ドロップストーン」とよばれる数センチメートルの礫岩が含まれている。

五大湖周辺での発掘調査

――今回は、どのような調査研究を行ったのでしょう？

まず、約22億年前の地層で、全球凍結と大酸化イベントの両方を記録している可能性があり、かつ連続性が保たれてい

©2010 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

る場所として、北米大陸の五大湖周辺に位置する米国ミシガン州とカナダ・オンタリオ州の２地域を調査しました。これらの地域の地層には、氷河性堆積物のすぐ上に、ほぼ純粋な二酸化ケイ素からなる砂岩層(クォーツァイト層)があります。クォーツァイトはこれまで研究者から無視されてきたのですが、私たちはこの地層に注目して詳細な分析を行いました。

クォーツァイトは、雨によって、土壌中の鉱物に含まれる元素がほとんど完全に溶脱され、二酸化ケイ素だけが残されたものと考えられます。このような現象を「化学風化」といい、気温が高いほど反応が進みます。風化はどこでも常に起きていますが、今回のクォーツァイト層ほど完全に風化が進むのはまれでした。

さっそく、クォーツァイトに含まれる極微量の有機物の炭素同位体比を測ってみたところ、大規模な同位体比の低下(「負異常」という）が２段階で生じたことがわかりました。このことは、軽い ^{12}C が２度にわたって供給されたことを意味します。しかも、風化度（風化の程度を表す指標）が２度にわたって急激に増加したこと、つまり、この時期に極めて急激な温暖化が生じたこともわかりました。

もう一方のオンタリオ州の地層でも、ミシガン州と全く同様の特徴がみられることを確認しました。

原因はメタンハイドレート？

―― どのようなことが示唆されるのでしょう？

私たちは、このような急激な温暖化と軽い炭素の供給を可能にするのは、メタンハイドレートの分解によるメタンの供給しかないと考えています。メタンハイドレートは「水分子からなるカゴの中にメタン分子が抱え込まれた固体結晶」で、現在でも永久凍土や海底の堆積物中に多く存在します。メタンハイドレートのメタンは、メタン生成菌によって水素と二酸化炭素から作られるのですが、非常に軽い炭素同位体比をもつことが知られています。私たちは、この軽いメタンが大気中に放出されたことで、急激な炭素同位体比の負異常が起きたのではないかと推測しています。

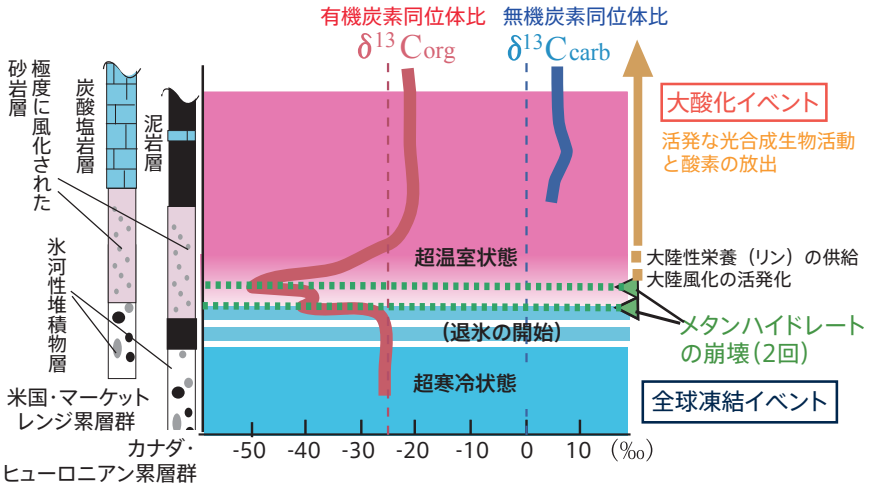

図 2. 約 22 億年前の全球凍結直後の炭素同位体比の変動。米国・カナダの両地域において、有機物の炭素同位体比の大きな負へのシフトが 2 段階で生じたことを示唆している。その上の地層では、大酸化イベントを示す炭素同位体比の正異常がみられる。

おそらく、全球凍結を終わらせることになった温暖化によってメタンハイドレートの分解が進み、結果として、２度にわたる大量のメタン放出が起き、さらなる温暖化を引き起こしたのでしょう。そして、この超温暖化が、陸の風化を極度に促したのだと思います。

同時に、温暖化による何らかの要因が陸から海中へのリンの供給を増やし、酸素を作り出すシアノバクテリアの大増殖をもたらしたと考えられます。というのは、生物の光合成活動はリンの量によって上限が決められ、海水中のリンの総量は陸からの供給によって決まるからです。なぜリンの供給が増えたかという点を含め、現在、北欧でも調査を行い、岩石試料の分析と検証を行っているところです。

今回の成功のカギは、これまで研究者たちが無視していたクォーツァイト層に注目して詳細に調べた点にあったと考えています。共同研究者である関根康人（せきねやすひと）さん（東京大学）の優れた着眼点と実行力によるものです。また、同じく共同研究者である大河内直彦（おおこうちなおひこ）さん（海洋研究開発研究機構）と同機構の最新装置のおかげで、極微量の有機物の炭素同位体比を正確に分析できたことも幸運でした。私は、こうした研究を通じて「生命進化が可能な惑星環境の条件」を理解したいと考えており、今後も地球史と惑星科学の両方を見据えた研究を続けたいと思っています。

―― ありがとうございました。 ■

聞き手は西村尚子（サイエンスライター）。

1. Sekine, Y., Tajika, E., Ohkouchi, N., Ogawa, N. O., Goto, K., Tada, R., Yamamoto, S. & Kirschvink J. L. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **11**, Q08019, doi:10.1029/2010GC003210 (2010).

AUTHOR PROFILE

田近　英一

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻教授。1992 年、東京大学大学院理学系研究科で博士号（理学）を取得。その後、日本学術振興会特別研究員として東京大学気候システム研究センター（1992 ～ 1993 年）、東京大学大学院理学系研究科助手（1993 ～ 2002 年）、准教授（2002 ～ 2010 年）を経て、2010 年、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。地球や惑星の表層環境の進化・変動・安定性に関する研究を推進している。

©2010 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved