

太古代チャートに残された原始大気のカセノン(Xe)同位体組成

カセノンは最も質量数の大きい不活性ガスであり、その同位体比は大気の起源や進化を解明する重要な手がかりとされている。しかし、原始大気のカセノン同位体組成は未知であり、カセノン同位体比の分別のしくみについてもよくわかっていなかった。地球化学者の G. アヴィスらは、33 億年前に堆積したとされる南アフリカのバーバートン地方のチャート中に含まれる流体包有物中の気体を抽出し、カセノン、アルゴン、クリプトンといった希ガス同位体比を分析し、この問題に一石を投じた[1]。

得られたカセノン同位体比は、現在の大気のカセノン同位体比に対して、 $12.9 \pm 2.4\%$ の質量依存同位体分別が認められた。また、 ^{129}Xe 超過異常(excess)が小さいことから、放射性元素起源のカセノン成分は効率的に脱ガスしたことが示唆された。原始大気中のカセノン同位体比は、コンドライト隕石のカセノン同位体比(Q-Xe)や太陽風起源のカセノン同位体比(SW-Xe)とも異なっているが、理論的に導かれている組成(U-Xe)と符合していることが示された。この原始大気のカセノン同位体比は彗星からもたらされた可能性があるという。

この問題を考えるには、地球大気とマンツルのカセノン存在度と同位体比がどのように決定されたのかに関する前提をはっきりさせる必要がある。地球のマンツル物質に含まれる希ガスがどのように地球内部にもたらされたのかについては、ネオンの同位体比の端成分に基づいて太陽組成に由来するという考え(ソーラータイプ)と、クリプトンやカセノンの同位体比に基づいてコンドライト隕石に由来するという考え(プラネタリータイプ)が存在していた。さらに、 ^{129}Xe 、 $^{131-136}\text{Xe}$ のような放射性元素(40 K、129 I、244Pu、238U)の核分裂で生成される同位体は、地球内部で生成されるため、マンツルと大気間の揮発性物質の循環も関係していることを考慮する必要がある。実際、現在の地球大気にこれらの同位体が存在することは、大気中のカセノンの一部は地球内部からの脱ガスしてきたものであることを物語る。しかし、地球大気の起源、とりわけ大気中のカセノンの同位体比の歴史については謎の部分が多かった。

コンドライト隕石中のカセノンの存在度と比較すると、地球大気中のカセノンの存在度は枯渇しており、Xe/Kr に関しては相対的にファクターで ~ 20 程度小さい値になっている。その一方で、大気中のカセノンの同位体比で質量数の大きなものは Q-Xe や SW-Xe に比べて 30-40%過剰となっており、カセノン・パラドックスと呼ばれてきた。こうしたパラドックスに対し、大気上空での紫外線や放射線によるカセノンのイオン化と宇宙への散逸といった過程で生じる質量に依存した同位体分別の効果を補正すると、重いカセノン同位体比も相対的に枯渇していることが説明できる可能性が浮上した。この考えに基づいて、軽いキ

セノン同位体に対しては太陽風組成をもち、重いキセノン同位体比に枯渇した仮想的な始源組成モデルが提案され U-Xe と呼ばれているが、こうした成分が実際に存在したかどうかは不明であった。

今回の分析には、バーバートン・グリーンストーンベルトに含まれるクロンベルグ層を掘削した試料中に含まれているチャート層が用いられた。すなわち、太古代の堆積岩中に当時の大気が化石として残されている可能性があるという発想で研究が進められた。キセノンの同位体分別の大きさを ^{130}Xe に対する比率で表した分析結果をみると、軽いキセノン同位体比は過剰になっている一方、重いキセノン同位体比は枯渇していた。 ^{129}I 起源の ^{129}Xe の同位体分別の影響は小さいことから、分析した試料中にマントル起源のキセノンが混合した可能性が低く、質量による分別の違いを示すキセノン同位体比は、33 億年前の大気中のキセノン同位体比を示していると解釈された。さらに、 ^{130}Xe について、現在の大気中の同位体比と比較すると、 $12.9 \pm 2.4\%$ u-1 高い値を示しており、大気中のキセノン同位体比が地球史を通じて、経年変化していることが示された。

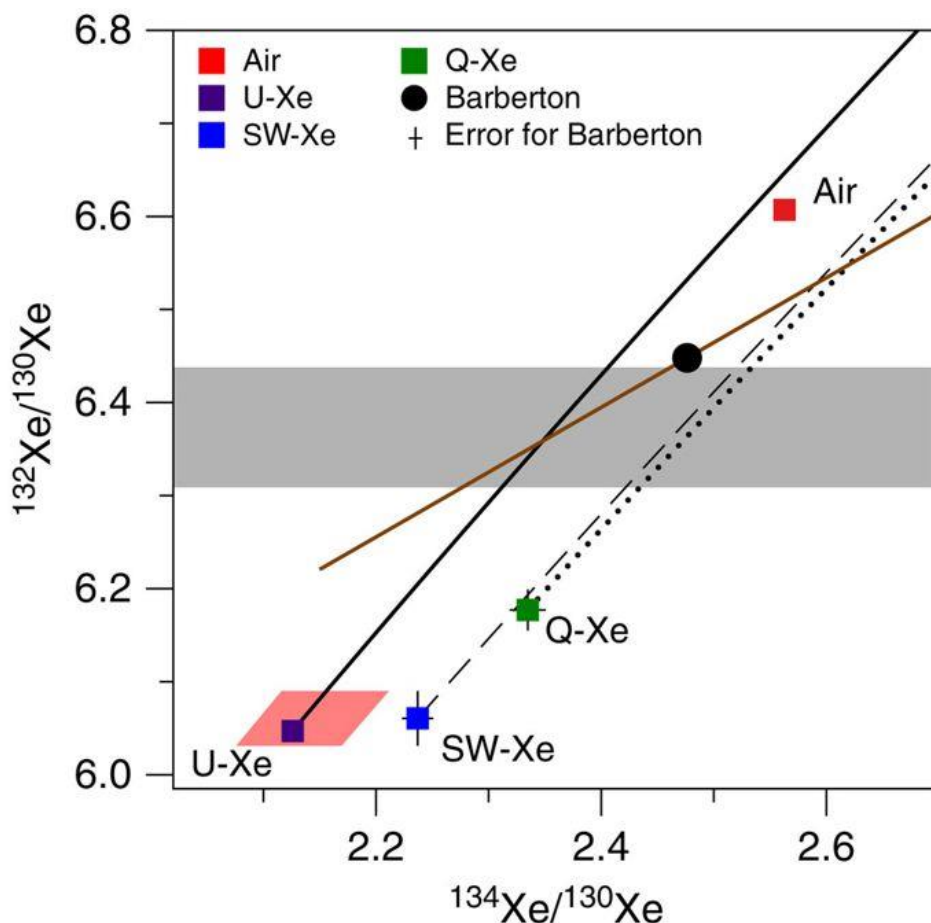


図1. 原始大気中のキセノン同位体比の初期値と、同位体分別によって、33 億年前の大気組成に至るまでの筋道を示したモデル[1].

アヴィスらは、キセノン同位体比の起源と進化に関する新たなモデルを提案している(図1)。このモデルによると、原始大気はU-Xeと符合するキセノン同位体比をもっていた(図1のピンクのエリア)。その後、大気上空での質量に依存した同位体分別を受けて、黒い直線上で組成が変化し、図1のグレイで示された値へと至る。さらに、図1の茶色の実線で示されるような放射性元素の核分裂で生じる同位体の付加で、バーバートン・グリーンストーンベルト中のチャートの分析で得られた値へと至った。図1の青や緑のポイントはSW-Xe、Q-Xeの値を示すが、これらの同位体組成をもつ大気が質量に依存した同位体分別や放射性核種の核分裂によって生じたキセノン同位体の付加によっては、図中の点線や一点鎖線のような経路で変化するのでは、黒丸の分析値を説明することはできない。

新たに提案されたモデルによると、地球マントルに含まれるキセノンと原始大気に取り込まれたキセノンは起源が異なることになる。

[1]Avice G., B. Marty and R. Burgess (2017) The origin and degassing history of the Earth's atmosphere revealed by Archean xenon. *Nature Communications* 8, 15455. DOI:10.1038/ncomms15455.