



The Extra-terrestrial Noble Gases in Deep Sea Sediments

甘利, 幸子

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1986-10-15

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0636

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000636>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	あま り さち こ 甘 利 幸 子 （長野県）
学 位 の 種 類	学 術 博 士
学 位 記 番 号	学博い第85号
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の日付	昭和61年10月15日
学 位 論 文 題 目	The Extra-terrestrial Noble Gases in Deep Sea Sediments (深海底堆積物中の地球外起源の希ガス)
審 査 委 員	主査 教授 伊 東 敬 祐 教授 宮 垣 盛 男 教授 安 川 克 己 東京大学教授 小 嶋 稔

論 文 内 容 の 要 旨

1. 序 論

深海底堆積物のヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) は何人かの研究者によって、測定されている。Ozima et al. は太平洋の深海底堆積物の $^3\text{He}/^4\text{He}$ を測定したところ、その中には 5×10^{-5} 以上を示すものも多く見られ、中には 1×10^{-4} を示す物もあったことを報告している。このような高い値は堆積物になんらかの地球外起源物質が付け加わったとしてしか説明できない。彼らは異なった地点、異なった年代の堆積物でこのような高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ が観察されることから、隕石の衝突のような突発的な出来事のためでなく、宇宙塵 - IDPs (Interplanetary Dust Particles) - の降下という恒常的かつ汎世界的な現象のために引き起こされたと考えた。この地球外起源物質について次の2点を目標に研究を行った。まず第一に地球外起源物質の希ガスの同位体比を決定する事である。第二に地球外起源物質そのものを物質科学的に同定することである。

2. 実験手順

使用した3個の試料はいずれも太平洋から採取された堆積物である。堆積物中の He を含んだ地球外起源物質を実際に見いだすためにまず堆積物を磁石で分離し、磁性成分と非磁性成分に分けて、それぞれの部分について He の同位体比および濃度を測定した。後に述べるように地球外起源物質は磁性成分に濃集することがわかったので、さらに磁性成分の希ガスは段階加熱法で測定し、磁性成分中の磁性鉱物は熱磁気分析で調べた。

3. 結 果

磁性成分と非磁性成分の、He 同位体比と濃度を測定した結果、磁性成分はほぼ 2×10^{-4} を示しているが、非磁性成分は 0.5×10^{-4} であり、また ^3He の濃度も磁性成分の方が非磁性成分より 2 桁も多い事がわかった。これらの結果から地球外起源物質が磁性成分に濃集している事が結論された。他の 2 つの地点で採取された堆積物でも、磁性成分に地球外起源物質が濃集することが確認された。そこで 2 個の磁性成分の全ての希ガスの濃度、同位体比を段階加熱法により測定した。

$^3\text{He}/^4\text{He}$ は放射性壊変による ^4He が放出された低温での結果を除けば、高温では 3 つの磁性成分ともほぼ一定の値 (2×10^{-4}) を示している。これは炭素質隕石に見られる始源的な He-A (1.4×10^{-4}) と太陽風を受けた隕石や月のソイルに見られる He-B (3.9×10^{-4}) とも異なっており新しい成分であると考えられる。またこの新しい成分が高温で観察されることから地球外起源物質に堅く保持されていることがわかる。

$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ は 2 個の磁性成分で全ての温度範囲で 11 から 12 の間にあるが、 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ は 1 個の磁性成分では 0.03–0.06 の間を変動している。 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ から破碎反応による Ne はせいぜい全体の Ne の 2 % にすぎない。磁性成分の $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ は炭素質隕石に始源的に保持されたと考えられる Ne-A と太陽風起源の Ne-B とも異なっており、新しい成分と考えられる。Ne は $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ が 11–12 の成分が大部分であり、それにごく少量の破碎反応の成分が付け加わったものと結論される。

$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ は温度によって変動した。低温では ^{40}K の壊変で生成された ^{40}Ar が放出されたため、空気 (295.5) より高い値を示した。一方高温では空気より低い $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ が観察され、地球外起源物質の存在が確認された。一方 $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ は 2 つの磁性成分の全ての温度で、0.18–0.20 であり、破碎反応によってできる成分は無視できる程度であろう。

Kr と Xe は誤差の範囲内で空気の同位体比と同じであった。これらは地球起源の希ガスと考えられる。

また熱磁気分析の結果から、磁性成分の磁性鉱物は主にチタノマグネタイトであった。チタノマグネタイトの大部分は地球起源であり磁性成分中の地球外起源物質はごく少量であると推測される。

4. 議 論

同位体比から磁性成分の He と Ne は (放射性起源の ^4He を除いては) 地球外起源物質の持っている希ガスであることがわかった。ゆえに主に He と Ne のデータを使って地球外起源物質の希ガスの起源を議論する。

堆積物中の地球外起源物質として最も妥当なのは IDP である事は前にも述べたが、IDP は惑星間空間を浮遊していたものである。そのような IDP が効率よく希ガスを取り込む機構として最も考えやすいのは表面積が関係する機構、つまりイオンのたたき込みと考えられる。それには太陽風と、ソーラーフレアのたたき込みが考えられる。この 2 つの機構について堆積物の地球外起源物質の場合、どちらが妥当であろうか。

磁性成分中の He と Ne が太陽風起源だと考えると説明が困難な事実が 2 つある。第一に、最初に

観察された He と Ne の同位体比は太陽風の値とは異なることである。第二に地球外起源物質の希ガスは、高温で放出されることである。ごく表面にしかうち込まれない太陽風の希ガスが高温まで放出されず保たれているということは考えにくい。

次にソーラーフレアの場合を考えてみる。ソーラーフレアのエネルギーは太陽風より 100 倍以上高く ($10^5 - 10^7$ eV), 粒子内部まで深く打ち込まれる。これは地球外起源物質の希ガスが高温で放出される事実をうまく説明できる。またソーラーフレアの同位体比であるが Ne については人工衛星、月のソイルや隕石を使って測定されている。月のソイルの値は、11 と 12 の間にあり磁性成分の地球外起源物質の $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ とよく一致している。しかし人工衛星で直接測定したソーラーフレアの Ne の同位体比は月のソイルや隕石の値と異なっている。これには 2 つの原因が考えられる。まず第一に同じエネルギーのフレアでもフレアごとに同位体比が異なっている可能性があることである。月のソイルはたくさんのフレアの平均を見ているのに対し、人工衛星での値は 1 つのフレアの同位体比を測定しているの、これらの値の違いは、フレアの“平均値”と個々の値のずれによるためである可能性がある。第 2 に、フレアのエネルギーにより同位体比が異なっている可能性があることである。ヘリウムについては同位体比がフレアのエネルギーの関数であるという報告がある。人工衛星で測定されたフレアのエネルギーは、8 - 51 MeV である。それに対し月のソイルでのデータはほぼ 1 MeV, あるいは 5 MeV/n 程度と推測されている。

この 2 点について堆積物中の希ガスを含んだ地球外起源物質として最も可能性が高い IDP の場合はどうであろうか。IDP の宇宙線照射年代は 10^4 年と推定されており、IDP は 10^4 年間のフレアの平均の Ne 同位体比をもっていることになり月のソイルの場合と一致する。次に IDP が保持しているフレアのエネルギーを考えてみる。大気圏突入の際に溶融せずに地上に降ってくる IDP の大きさは約 50 μm 以下であり、また成層圏で捕獲する IDP の典型的な大きさは、10 μm である。粒子のエネルギーと打ち込まれる深さとの関係から、大きさ 10 μm の IDP は 1 MeV/n 以下のエネルギーの Ne を保持できることがわかる。同様に 50 μm の IDP だと数 MeV/n までの Ne を保持できることになる。このエネルギーの範囲は月のソイルのものとよく一致する。ゆえに深海底堆積物中の地球外起源物質 (IDP) の Ne は数 MeV 以下のエネルギーのソーラーフレアが起源であろうと考えられる。低いエネルギーのソーラーフレアの He の同位体比のデータがないので確認できないが、He もまた Ne と同様に数 MeV 以下のエネルギーのフレアの He であろうと推測される。

堆積物中の地球外起源物質であると考えられる IDP は、惑星間空間に浮遊している間、いろいろなエネルギーの荷電粒子 (太陽風、ソーラーフレア、銀河宇宙線) にさらされている。当然 IDP にそれらの希ガス、あるいはエネルギーの高い粒子による破碎反応によって生成された希ガス成分が混在しているのではないかと予想される。しかし Ne は同位体比のデータから、数 MeV 以下のソーラーフレアの希ガスが大部分であることがわかった。これは以下のような原因によると考えられる。まず第一に IDP が大気圏に突入する際に、破碎反応成分がイオンのたたき込みによる成分より相対的に多い大きな粒子は溶融してしまうことが挙げられる。溶融をまぬがれた小さな粒子のうちこまれるソーラーフレアのエネルギーもある一定の範囲 (数 MeV 以下) に限定されてしまう。

第二に大気圏突入の際の温度上昇、および堆積物中で沈澱している間に拡散がおこる事が挙げられる。表面に打ち込まれた成分の中では、太陽風は粒子のごく表面だけに存在するに対し、ソーラーフレアは粒子内部まで打ち込まれている。表面にある太陽風成分はソーラーフレアに比べて拡散でぬけやすいと考えられる。

これらの2つの要因により破砕反応による成分および太陽風の成分は減少し、堆積物中の地球外起源物質のNeは数MeV以下のフレアの同位体比を示すのだろう。

最後にCIコンドライトに似た組成をもつIDPがなぜ磁性成分に濃集するかということであるが、大気圏突入のさいに熱的な刺激を受けてIDP中の非晶質なケイ酸塩が分解しマグネタイトが生成されるためと考えられる。

5. 結 論

我々の研究により深海底堆積物中の希ガスがソーラーフレア起源でありそのエネルギーが1MeV以下、せいぜい数MeV以下であることが同位体比から証明された。地球外起源物質のHeとNeは磁性成分の希ガスを測定する事により検出できたが、Kr以上の重い希ガスについては大部分を占める地球物質がもつ希ガスに地球外起源物質の希ガスは完全に隠れてしまっている。さらになんらかの方法で磁性成分から地球外起源物質を濃集することが、今後の課題である。

論文審査の結果の要旨

甘利幸子の研究は、地球の深海底堆積物の中に地球外起源の物質が混在していることを、希ガスの分析によって明らかにしたものである。

第一章では、この研究の背景と目的とが述べられている。地球外物質（例えば隕石）は、太陽系初期の情報を保存しているので、太陽系の起源を知る上で貴重な材料である。地球には $10^{-9}\text{g/cm}^2 \cdot \text{yr}$ の割合で地球外物質が塵の形で降り注いでいる。もしも、これを採取できれば、その意義は測り知れないが、至難である。一方、深海底の堆積速度は $10^{-4}\text{g/cm}^2 \cdot \text{yr}$ なので、深海底堆積物には 10^{-5} の割合で地球外物質が混在していると推論できる。この研究では、深海底物質の中から地球外物質をさがし出すことを目標とした。そのために、地球外物質と地球物質とを区別する最も有効な指標がHeの同位体の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比であることに着目し、更にHe以外の希ガスの同位体組成も使って、総合的にこの困難かつ重要な目標にせまろうとしたのが、この研究の特徴である。

第二章では、試料の処理と分析方法を述べている。試料は太平洋海底の泥質堆積物で、泥の中から 10^{-5} 以下の未知の物質を直接探し出すことは難しい。そこで、先ず濃縮法を工夫し、試料を磁性成分と非磁性成分に選別し、磁性成分に地球外物質の指標となる ^3He が2桁以上濃縮していることを発見している。分析には多量の濃縮試料が必要なので、ロボットを導入して磁力選別を自動化し、大量処理できるように工夫している。分析は、He、Ne、Ar、Kr、Xeの5種の希ガスすべてについて各々の同位体組成を質量分析計で段階加熱法によって精度よく測定している。段階加熱の採用

で、地球上での汚染の区別が可能となり、5種の希ガスの測定によって、総合的な判定が可能となっている。

第三章では実験結果が述べられている。地球外物質に多い ^3He が磁性成分に濃縮していることから、深海底の地球外物質は、磁性成分に含まれていることが確認された。磁性成分の熱磁気分析の結果は、磁性鉱物が主にチタノマグネタイトであることを示した。これは地球起源の鉱物なので、 ^3He を保持している地球外物質はこの磁性成分の中の更に極く一部であると推定される。希ガス分析の結果 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は 2×10^{-4} で、隕石中に保持されている始源的なHeとも、又太陽風をうけた月の土のHeとも異なる成分と推論される。Neの同位体比の結果は、 $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \approx 11 \sim 12$ で、これも又始源的Neとも太陽風Neとも異なり、宇宙線による破砕反応によるNeとも違っていると結論される。Arについても、地球外起源物質に由来する異常が発見されたが、Arの結果からも破砕反応による成分は無視できる程度と推定される。KrとXeは地球大気による汚染で、地球外成分についての情報は得られなかった。

第四章では、上記の実験結果と、これまでの地球外物質についての研究との比較から、深海底堆積物中の地球外物質と、その中の希ガスの起源を論じている。結論として、地球外物質は、太陽系空間を浮遊している惑星間塵であること、その中の希ガスの一部がマグネタイトにとり込まれて、深海底でも安定に保存されたこと、を推論している。

以上のように、この研究は、深海底の泥の中から、極微量の、しかも未知の地球外物質を探し出すという困難なテーマを丹念な分離作業と、精密な質量分析と、緻密な解析とでやりとげている。地球外物質そのものの同定ができなかったこと、そのために推論が状況証拠に頼っているという弱点はあるが、数多くの状況証拠を系統的につかみ出し、その上に論理的な推論を構成した点は十分評価できる。この研究の結果は、既に「Nature」など国際誌に発表され、国際学会でも注目されて同じテーマが国際的に競争及び協力して行われるきっかけとなっており、今後の一層の発展が期待されている。

本研究は地球科学、惑星科学、同位体化学、宇宙化学などの分野に関連する総合的研究であり、その成果がこれらの分野に寄与するところは大きい。よって、論文提出者甘利幸子は学術博士の学位を得る資格があると認める。