

## 二酸化ケイ素が地球表層の窒素を地球超深部へ運ぶ

### 1. 発表者：

- 鍵 裕之（東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設 教授）  
福山 鴻（東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 博士課程3年生）  
井上 徹（広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授）  
柿澤 翔（広島大学大学院先進理工系科学研究科 助教、研究当時：東京大学大学院理学系研究科 特任研究員）  
新名 亨（愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター 講師・ラボマネージャー）  
菱田 俊一（物質・材料研究機構 NIMS 特別研究員）  
高畑 直人（東京大学大気海洋研究所海洋地球システム研究系海洋化学部門 助教）  
佐野 有司（東京大学大気海洋研究所附属高解像度環境解析研究センター 教授）

### 2. 発表のポイント：

- ◆ 高温高压実験と二次イオン質量分析法（注1）による局所分析によって、地球深部の鉱物中にとりこまれる窒素の溶解度を決定した。
- ◆ 堆積物や大陸地殻が沈み込んで地球深部で形成されるステイショバイト（注2）に高濃度で窒素が取り込まれることがわかった。
- ◆ 地球表層から沈み込んだ窒素はステイショバイトとともに下部マントル（注3）まで運ばれ、蓄積していく。地球大気は地球深部鉱物と共に進化してきた。

### 3. 発表概要：

窒素は大気的主要成分であり、生命活動にも欠かすことができない重要な元素である。しかし、地球全体で考えると窒素の濃度は他の揮発性物質と比べて著しく低く、その原因は謎に包まれている。現在のところ、地球の進化過程で揮発して地球外に窒素が飛散した可能性や、地球深部に窒素が貯蔵されている可能性が指摘されている。

東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設の鍵裕之教授、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程3年の福山鴻大学院生らの研究グループは、地球深部（深さ約750-800 km）の温度、圧力、酸素分圧を再現した高温高压実験によって地球深部の鉱物を合成し、二次イオン質量分析法（NanoSIMS）による局所分析によって窒素の溶解度を測定した。その結果、ステイショバイトに400 ppmもの高濃度で窒素が溶け込むことがわかった。

ステイショバイトは地球表層の堆積物や大陸地殻が沈み込む過程で生成し、下部マントルまで分解せずに到達することから、ステイショバイトが地球表層の窒素を下部マントルまで運びうることを示された。現在の大気中の窒素濃度は78%であるが、本研究の結果は過去の大気中の窒素濃度が現在よりも高かったことを支持し、暗い太陽のパラドックス（注4）を解決に導くかもしれない。

### 4. 発表内容：

窒素は地球大気の約78%を占め、生命活動にも欠かすことができない重要な元素である。さらに、大気中の窒素濃度は地球の環境を支配する重要なパラメーターの一つでもあるが、窒素濃度が過去にどのように変動したかは現在でも議論が分かれている。地球の原料となった隕

石と地球とで、いくつかの揮発性物質の濃度を比較すると、地球の窒素濃度は著しく低い。地球が進化する過程で揮発性の高い窒素が宇宙空間に飛散したかもしれないし、地球深部に窒素の貯蔵庫が隠れている可能性もある。

東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設の鍵裕之教授、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程3年の福山鴻大学院生らの研究グループは、下部マントルに相当する温度、圧力、酸素分圧を再現した高温高压実験を行い、回収された鉱物の窒素濃度を分析したところ、石英（ $\text{SiO}_2$ ）の高圧相であるスティショバイトにこれまでの報告をはるかに超える高濃度の窒素が取り込まれることを明らかにした。高温高压実験は愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センターのマルチアンビル高压発生装置を使用した。温度圧力条件は28 GPa、1400°C-1700°Cで、Fe-FeOをバッファーとして用いることによって、深さ約750-800 kmに相当する下部マントルの条件を再現した。回収した試料中に含まれる窒素濃度は、大気海洋研究所の二次イオン質量分析計（NanoSIMS）を用いた局所分析によって定量した。なお、窒素濃度の標準試料は物質・材料研究機構にて、石英ガラスに既知量の窒素イオンを注入して作製した。

実験の結果、スティショバイトの窒素溶解度は温度の上昇とともに90 ppmから404 ppmへと増加することがわかった（図1）。このことは窒素がスティショバイト結晶中の格子欠陥に取り込まれている可能性を示唆している。これまでマントルを構成する鉱物中として、オリビン、エンスタタイト、ウォズレアイト、リングウッドイト、ブリッジマナイトへの窒素溶解度が報告されている。これらの鉱物中で最も窒素溶解度が高いウォズレアイトでも約190 ppmで、下部マントルの主要構成鉱物であるブリッジマナイトへの窒素の溶解度は約20 ppm程度である。本研究で得られたスティショバイト中での窒素の溶解度はマントルの鉱物できわだって高いことがわかる。

スティショバイトは沈み込むスラブによって地下深部にもたらされる堆積物や大陸地殻物質が高温高压下で相転移することで生じる主要鉱物である。地球表層では窒素は粘土鉱物などに取り込まれて沈み込み、地球深部でそれらの鉱物からスティショバイトが窒素を受け取り、下部マントルまで運ぶ。下部マントルではその主要構成鉱物であるブリッジマナイトや微量な金属鉄が窒素を貯蔵していく。本研究の見積もりによれば、スティショバイトによって地球深部に持ち込まれる窒素の量は年間500キロトン（ $5.0 \times 10^8 \text{ kg}$ ）である。地球史を通じてこの量が一定であると仮定すれば、プレートテクトニクスが始まってから現在までスティショバイトによって地球深部に持ち込まれた窒素の量は現在の地球大気の窒素量の約半分に相当する。一方、地球化学的に見積もられている地球深部からの大気への窒素の放出量は年間115トン（ $1.15 \times 10^5 \text{ kg}$ ）で、沈み込む窒素の方が放出される窒素よりも3桁以上大きい。したがって、地表の窒素はスティショバイトによって地球深部に持ち込まれて枯渇していくことになり、本研究は過去の大気は現在よりも1.5倍ほど窒素濃度が高かったことを示唆している（図2）。

大気の組成が地球深部の鉱物によって支配されてきたかもしれないということだけでも興味深い発見であるが、本研究は過去の地球の気候についても重要な指針を与えることを指摘したい。もしも過去の大気の窒素濃度が高いと、二酸化炭素などの温室効果ガスによる温暖化が促進されることが報告されており、暗い太陽のパラドックスを解決する可能性もある。

今後はもっとも下部マントルで存在度の高いブリッジマナイトへの窒素溶解度をより高い精度で決定し、全地球での窒素の挙動を明らかにしていきたい。

本研究成果は、科研費挑戦的萌芽研究(課題番号 15K13600)、新学術領域研究(課題番号 15H05828)、基盤研究 S(課題番号 18H05224)、特別研究員奨励費(課題番号 18J21771)の支援を受けた。高温高压実験は愛媛大学先進超高压科学研究拠点における共同利用プログラムを利用して行った。

本研究成果は 7 月 2 日付で *Scientific Reports* に掲載される予定です。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：*Scientific Reports*

論文タイトル：High nitrogen solubility in stishovite (SiO<sub>2</sub>) under lower mantle conditions

著者：Ko Fukuyama, Hiroyuki Kagi, Toru Inoue, Sho Kakizawa, Toru Shinmei, Shunichi Hishita, Naoto Takahata, Yuji Sano

DOI 番号：10.1038/s41598-020-67621-2

アブストラクト URL：<https://www.nature.com/articles/s41598-020-67621-2>

## 6. 注意事項：

日本時間 7 月 2 日 (木) 午後 6 時 (英国夏時間：7 月 2 日 (木) 午前 10 時) 以前の公表は禁じられています。

## 7. 問い合わせ先：

(研究に関すること)

東京大学大学院理学系研究科 附属地殻化学実験施設

教授 鍵 裕之

TEL：03-5841-7625 E-mail：[kagi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:kagi@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp)

広島大学大学院先進理工系科学研究科

教授 井上 徹

TEL：082-424-7460 E-mail：[toinoue@hiroshima-u.ac.jp](mailto:toinoue@hiroshima-u.ac.jp)

愛媛大学先端研究・学術推進機構

教育研究高度化支援室、地球深部ダイナミクス研究センター

講師・ラボマネージャー 新名 亨

TEL：089-927-8158 E-mail：[shinmei@sci.ehime-u.ac.jp](mailto:shinmei@sci.ehime-u.ac.jp)

東京大学大気海洋研究所 海洋地球システム研究系海洋化学部門

助教 高畑 直人

E-mail：[ntaka@aori.u-tokyo.ac.jp](mailto:ntaka@aori.u-tokyo.ac.jp)

(報道に関すること)

東京大学大学院理学系研究科・理学部

特任専門職員 武田 加奈子、教授・広報室長 飯野 雄一

TEL：03-5841-0654 E-mail：[kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp](mailto:kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp)

広島大学財務・総務室広報部広報グループ

TEL : 082-424-3749 E-mail : koho@office.hiroshima-u.ac.jp

東京大学大気海洋研究所 広報室

E-mail : kouhou@aori.u-tokyo.ac.jp

## 8. 用語解説 :

### (注1) 二次イオン質量分析法

固体の表面に微細なイオンビームを照射し、発生する表面からの二次イオンを質量分析で検出することで固体中の微量元素を高い空間分解能で測定する手法。本研究では大気海洋研究所に設置された NanoSIMS を使用して測定を行った。

### (注2) スティショバイト

石英 ( $\text{SiO}_2$ ) の高圧相で、おおむね 10 GPa 以上の圧力で熱力学的に安定となり、地球内部ではマントル遷移層、下部マントルに存在すると考えられる。

### (注3) 下部マントル

固体地球は表層から、地殻、上部マントル、マントル遷移層、下部マントル、D'層、外核、内核という層状構造をとる。この中で、下部マントルは地球の全体積の6割以上を占め、下部マントルの8割以上をブリッジマナイトという鉱物が占める。

### (注4) 暗い太陽のパラドックス

地球形成初期には太陽の光度は現在の7割程度しかなく、地球上に液体の海が維持できない環境だったが、実際地球は凍結しておらず矛盾となっている。

9. 添付資料 :

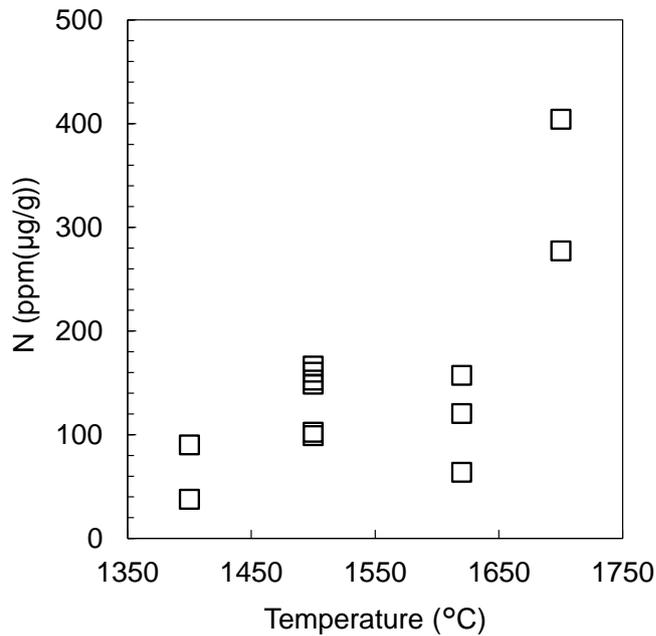


図1 : スティショバイトの窒素溶解度の温度依存性

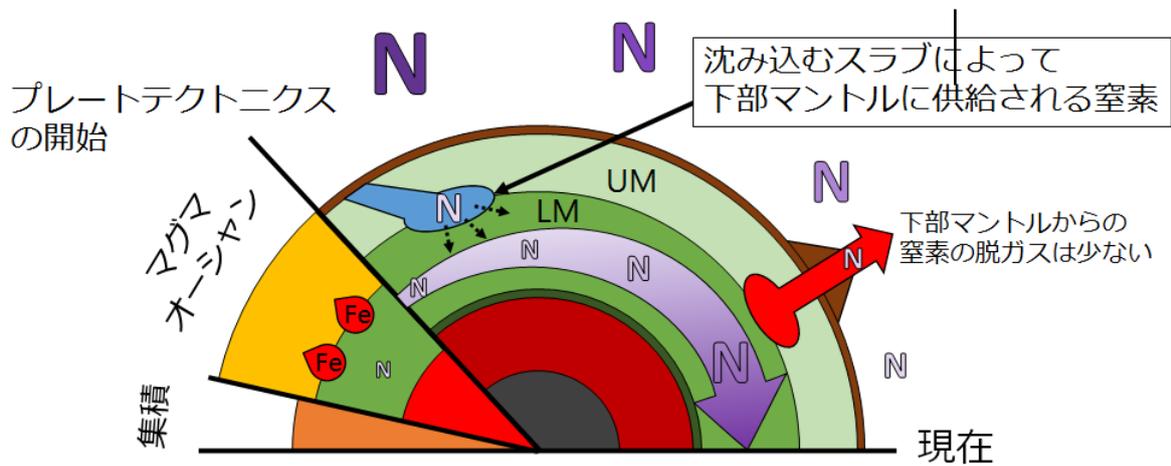


図2 : プレートテクトニクスの開始とともに地球表層の窒素が地球深部に沈み込み、下部マントルに蓄積され、大気中の窒素は減少していく。UM:上部マントル、LM: 下部マントル、OIB: 海洋島玄武岩