

大気中のアルゴン量と同位体比から制約するタイタン脱ガス史

Titan's degassing history constrained by the isotopic ratio and abundance of Ar in the atmosphere

洪 鵬^{1*}, 関根 康人¹, 長 勇一郎², 杉田 精司¹HONG, Peng^{1*}, SEKINE, Yasuhito¹, CHO, Yuichiro², SUGITA, Seiji¹¹ 東京大学 複雑理工学専攻, ² 東京大学 地球惑星科学専攻¹Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, ²Earth & Planetary Sci., Univ. of Tokyo

タイタン地表面の揮発性成分量の変遷を明らかにすることは、大気表層進化や気候システムの理解にとって重要である。近年のカッシーニ探査によって、タイタン地表面に大規模な液体 CH₄ の海が存在しないこと、また放射性 ⁴⁰Ar が多く大気中に存在することが明らかになったことは、比較的最近に内部からの脱ガスがあった可能性を示唆するが、その時期や規模はほとんど分かっていない。内部からの脱ガスの時期や、現在の状態を説明するための必要条件を明らかにすることは、タイタンの熱史や内部状態、初期進化に対しても重要である。

本研究ではタイタン大気中の脱ガス史を制約するため、大気中の ⁴⁰Ar と ³⁶Ar の存在量とその同位体比に着目した。Ar は化学的に安定であり、⁴⁰K の壊変でできる ⁴⁰Ar は太陽系初期にはほとんど存在しなかったと考えられるので、地球型惑星の脱ガス史の制約に広く用いられてきた (e.g., Hamano & Ozima, 1978; Tajika & Sasaki, 1996)。本研究では地球の Ar 脱ガスモデル (Ozima, 1975) に基づき、タイタン大気中の脱ガスモデルを立てた。大気と固体の 2 つのボックスを考え、それぞれのボックス内での ³⁶Ar 量と ⁴⁰Ar 量の時間進化を計算した。固体には岩石と氷が含まれ、³⁶Ar と ⁴⁰Ar は固体中で均質に分布していると仮定した。初期状態として、岩石中の ⁴⁰K と ³⁶Ar 濃度は CI コンドライトの平均値 ($[^{40}\text{K}] = 0.77$ ppm, $[^{36}\text{Ar}] = 1.25$ ppb) (Mazor et al., 1970; Lodders, 2003) を用い、氷には ⁴⁰K と ³⁶Ar は含まれないと仮定した。また脱ガスした Ar は散逸せず、全て大気中に留まるとした。固体から大気への脱ガス量は固体ボックス内の Ar 量と脱ガス率の積として表し、脱ガス率の時間変化は (1) タイタン形成時から一定 (連続脱ガス)、または (2) ある時点で大規模な脱ガスが起きる (間欠脱ガス) (e.g., Tobie et al., 2006)、という 2 種類の極端な場合を考える。

その結果、連続脱ガスと間欠脱ガスのどちらの場合であっても、現在の大気中の ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比 (106 - 295, Niemann et al., 2010) を説明できないことがわかった。連続脱ガスを仮定した場合、現在の大気中の ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比は 39 となり、³⁶Ar が ⁴⁰Ar に比べて 3 倍程度過剰に存在してしまう。また、間欠脱ガスを仮定した場合、現在の大気中に存在する全ての Ar がごく最近に脱ガスしたとしても、大気中の ⁴⁰Ar/³⁶Ar は 56 でしかなく、やはり ³⁶Ar が ⁴⁰Ar に比べて 2 倍程度過剰に存在する。これはタイタン固体部分の ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比が太陽系の形成から 45.5 億年経ても最大で 56 にしかならず、現在の大気中の ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比に達するほど上昇しないためである。

現在の大気中の ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比を説明するためには、(1) 比較的初期において、³⁶Ar の 60% 以上がタイタンから散逸すること (間欠脱ガスの場合) (連続脱ガスの場合は ³⁶Ar の 75% 以上) または (2) 脱ガス源となる氷マグマ中の ⁴⁰K 濃度が CI コンドライトに対して 2.6 倍以上高いこと (間欠脱ガスの場合) (連続脱ガスの場合は 4.2 倍以上の濃集)、という条件が必要である。(1) の場合は、集積中に ³⁶Ar が大規模に脱ガスし、それが後に力学的に散逸したという可能性を示している (Kuramoto & Matsui, 1994; Lammer et al., 2008; Sekine et al., 2011)。一方、(2) については、初期にタイタン内部が融解することにより (Kuramoto & Matsui, 1994)、可溶性の ⁴⁰K が岩石成分から内部海に濃集し、⁴⁰Ar/³⁶Ar 比の高い氷マグマ源を形成したという可能性を示す。これらのことは、(1)(2) のいずれの場合でも、形成初期における大規模融解・脱ガス過程が必要であることを示しており、タイタンの形成時間が、一般的な円盤集積モデル (Canup & Ward, 2006; Barr et al., 2010) で予想されるよりも短く (e.g., < 10⁶ year)、またタイタン内部もこれまで考えられていたような未分化状態ではなく (Iess et al., 2010)、分化している可能性が高いこと (Fortes, 2012) を示唆している。

キーワード: タイタン, 脱ガス, 希ガス, 氷衛星, 大気進化

Keywords: Titan, degassing, rare gas, icy satellite, evolution of atmosphere