



Ph.D. 理学博士小嶋 稔氏の「希ガスの地球惑星化学」に対する授賞審査要旨

希ガスには発見順 (Ne 以下はほぼ同時) に、ヘリウム (He)、アルゴン (Ar)、ネオン (Ne)、クリプトン (Kr)、キセノン (Xe) がある。これらは化学的に不活性で、放射性起源の成分を除くと、地球創生時に地球に獲得された状態 (存在度や組成・同位体比) が現在まで保持されてきたと考えられるユニークな元素である。また、地球・隕石などでは極微量元素である上に多くの同位体、とりわけ放射性起源の成分を含むため、壊変などに伴う同位体組成の変化を検出しやすく、また時間軸を入れた議論が可能である。小嶋 稔氏が希ガス研究を始めた頃 (一九六〇年前後) は、希ガスは右記特徴を有する故に、地球の形成や進化には殆ど関係しないというのが世の常識であり、地球惑星科学分野における意義は、カリウム・アルゴン法による年代測定などツールとしての役割に限定されていた。小嶋氏は希ガスの持つこれらの特徴を逆に利用することにより、「希ガスの地球惑星化学」という地球惑星科学の一分科の創設と発展に大きく寄与した。

希ガスは宇宙 (太陽) においては決して稀な存在ではないが、地球型惑星や隕石では固体元素と比べて著しく欠乏する。欠乏度は軽い希ガス (ネオン・アルゴン) ほど著しい (地球の引力圏から逃げているヘリウムは議論から除外)。この事実は、地球や地球型惑星の大気は、形成時にまわりにあったガス (原始太陽系星雲) がそのままトラップされた (一次大気説) ものではないことを示す。そこで、一次大気は何らかのプロセスで惑星から吹き払われ、その後、惑星内部からの脱ガスによって現在の大気ができたと考えられるようになった (ブラウンの二次大気説)。脱ガスは、火山活動により地球史を通じて連続的に起きたとする考え (ルービーの連続脱ガス説) が長く支配的であったが、小嶋氏は一九七〇年代初頭に、大気は地球誕生後間もなく内部からのカタストロフィックな脱ガスによって大部分が形成されたとする「カタストロフィック脱ガス説」を提案した。

提案の根拠となったのは、 $^{40}\text{K}$  からの放射性壊変成分  $^{40}\text{Ar}$  と安定成分  $^{36}\text{Ar}$  との同位体比  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (以下 Ar 比) である。原始太陽系元素生成理論による初期地球の Ar 比  $\approx 0.001$  は、現在の大気 of Ar 比  $\approx 300$  とは大きく異なる。小嶋氏らは、海嶺玄武岩の Ar 比を測定し、その値が  $10000 \sim 30000$  と更に大きいことを見出した。小嶋氏はこれら三種類の Ar 比を説明する簡単な数値モデルを

構築し、初期地球内でアルゴンが大部分<sup>36</sup>Arであった時代にカタストロフィックな脱ガスが起こったこと、このため形成された大気は<sup>36</sup>Arに卓越する一方で地球内の<sup>40</sup>Arは極端に減少したこと、その後は地球内で<sup>40</sup>Kの崩壊による<sup>40</sup>Arが増加し連続脱ガスにより大気も次第に<sup>40</sup>Arに富んでいったことを示した。こうした数値モデルに基づき、地球大気の一〇%以上が地球誕生一億年以内に内部からのカタストロフィックな脱ガスにより形成され、その後の連続脱ガスにより二〇%以内が形成されたとする「カタストロフィック脱ガス説」が提唱されたのである。この説はその後の大気と海洋の起源・進化論の基礎をなすものとなった。

小嶋氏らは、「地球誕生一億年以内のカタストロフィック脱ガス」を更に検証するため、天然ダイヤモンド中のキセノンを取り出しその同位体比<sup>129</sup>Xe/<sup>130</sup>Xe（以下Xe比）を測定するという困難な実験を試みた。ダイヤモンドの多くは一〇億年以上前に地球深部で結晶し、以後外界に対して閉じた系をなす。測定されたXe比は六・七・七・五であり、大気中の値六・四九六よりも有意に大きい。ここで、<sup>129</sup>Xeは<sup>129</sup>Iの放射性壊変により生成されたものであるが、<sup>129</sup>Iは半減期が一七〇〇万年の消滅核種であり現存しない。上記Xe比の測定結果は、地球内部からの脱ガスは<sup>129</sup>Iが消滅する前（地球形成後一億年以内）に起こり、そのときのXe比が大気中に記憶される一方、取り

残された<sup>129</sup>Iの崩壊により地球内部のXe比は増加したことを示す。この実験は、ダイヤモンドという新奇な試料を用いて脱ガスの起こった時期を直接制約したものとして有名である。地球大気がマントルからの脱ガスで形成されたとする、希ガスの安定同位体比（例えば、アルゴンの<sup>38</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar比、クリプトンの<sup>86</sup>Kr/<sup>84</sup>Kr比、キセノンの<sup>128</sup>Xe/<sup>130</sup>Xe比など）は、大気とマントル（ダイヤモンドや海嶺玄武岩）とで値が一致すべきものであるが、その検証にあたっては小嶋氏のグループの測定が大きく貢献した。

惑星大気の新ガスの存在度パターンには著しい特徴がある。第一に太陽の新ガスと比較して、軽い希ガス（アルゴン、ネオン）ほど存在度が低い。第二は特にキセノンに顕著な質量依存同位体分別現象で質量数が小さい同位体ほど存在度が低下する。これら二つの特徴は、初期地球が微惑星（半径数km）の集合合体により形成されたとする従来の考え方では説明できない。微惑星は空隙に富むが空隙内のガスを重力的にトラップすることができず、一方、惑星にまで成長するとヘリウムより重いガスは宇宙空間に逃げられなくなるからである。小嶋氏らは微惑星から惑星への成長過程において、希ガスの上述の二つの特徴を同時に説明できる段階があることを見出し、地球はこの段階の天体（半径六〇〇km程度）が多数集まってできたとするモデルを提示した。このモデルは今も希ガスの元素組

成・同位体組成を同時に説明する唯一の地球形成モデルとして知られる。

以上、小嶋氏は希ガスを用いて、地球大気の起源と進化の解明に始まり太陽系における惑星の形成過程の理解まで、地球科学・惑星科学の基本的課題に独創的なアプローチを試み、目覚ましい成果を挙げた。また希ガス地球化学・宇宙化学のバイブル的教科書の出版を通じて分野の全体的進展にも寄与した。こうした業績に対し国の内外から数多くの賞が授与されている。

## 主要論文目録

### 論文

1. M. Ozima, Some experiments in potassium-argon dating. *J. Geophys. Res.*, 64, 2033-2034, 1959.
2. M. Ozima and M. Ozima, Origin of thermoremanent magnetization. *J. Geophys. Res.*, 70, 1363-1369, 1965.
3. M. Ozima, M. Ozima, and I. Kaneoka, Potassium-argon ages and magnetic properties of some dredged submarine basalts and their geophysical implications. *J. Geophys. Res.*, 73, 711-723, 1968.
4. M. Ozima, I. Kaneoka, and S. Aramaki, K-Ar ages of submarine basalts dredged from seamounts in the western Pacific area and discussion of oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 8, 237-249, 1970.
5. M. Ozima, S. Zashu, and N. Ueno, K/Rb and ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>0</sub> ratios of dredged submarine basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 10, 239-244, 1971.
6. M. Ozima, Magnetic processes in oceanic ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 13, 1-5, 1971.
7. M. Ozima and M. Ozima, Activation energy of unmixing of titanomagnetite. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 5, 87-89, 1972.
8. M. Ozima and K. Kudo, Excess argon in submarine basalts and an Earth-atmosphere evolution model. *Nat. Phys. Sci.*, 239, 23-24, 1972.
9. M. Ozima and K. Saito,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  stepwise degassing experiments on some submarine rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 20, 77-87, 1973.
10. M. Ozima, Was the evolution of the atmosphere continuous or catastrophic? *Nat. Phys. Sci.*, 246, 41-42, 1973.
11. M. Ozima, Ar isotopes and Earth-atmosphere evolution models. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 39, 1127-1134, 1975.
12. M. Ozima, K. Saito, M. Honda, and S. Aramaki, Sea water weathering effect on K-Ar age of submarine basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 453-461, 1977.
13. M. Ozima, I. Kaneoka, and H. Ujiie,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  ages of rocks, and the development mode of the Philippine Sea. *Nature*, 267, 816-818, 1977.
14. I. Kaneoka and M. Ozima,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  ages of a diabase sill and a basalt in the Central-Pacific Basin. *Nature*, 268, 132-133, 1977.
15. M. Ozima, M. Honda, and K. Saito,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  ages of guyots in the western Pacific and discussion of their evolution. *Geophys. J. Int.*, 51, 475-485, 1977.
16. N. Takaoka and M. Ozima, Rare gas isotopic compositions in diamonds. *Nature*, 271, 45-46, 1978.
17. M. Ozima, I. Kaneoka, and M. Yamagisawa, Temperature and pressure effects on  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  systematics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 42, 463-472, 1979.
18. M. Ozima and Y. Takigami, Activation energy for the thermal release of Ar from some DSDP submarine rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, 141-144, 1980.
19. M. Ozima and K. Nakazawa, Origin of rare gases in the Earth. *Nature*, 284, 313-316, 1980.

20. M. Ozima and S. Zashu, Primitive helium in diamonds. *Science*, 219, 1067–1068, 1983.
21. M. Ozima and S. Zashu, Noble gases in submarine pillow volcanic glasses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 24–40, 1983.
22. B. Marty, S. Zashu, and M. Ozima, Two noble gas components in a Mid-Atlantic Ridge basalt. *Nature*, 302, 238–240, 1983.
23. M. Ozima, M. Takayanagi, S. Zashu, and S. Amari, High  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratio in ocean sediments. *Nature*, 311, 448–450, 1984.
24. M. Ozima, F. A. Podosek, and G. Igarashi, Terrestrial xenon isotope constraints on the early history of the Earth. *Nature*, 315, 471–474, 1985.
25. S. Amari and M. Ozima, Search for the origin of exotic helium in deep-sea sediments. *Nature*, 317, 520–522, 1985.
26. M. Ozima, Looking for missing xenon. *Nature*, 321, 813–814, 1986.
27. S. Zashu, M. Ozima, and O. Nitoh, K–Ar isochron dating of Zaire cubic diamonds. *Nature*, 323, 710–712, 1986.
28. M. Ozima and S. Zashu, Solar-type Ne in Zaire cubic diamonds. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 19–25, 1988.
29. F. A. Podosek, J. Pier, O. Nitoh, S. Zashu, and M. Ozima, Normal potassium, inherited argon in Zaire cubic diamonds. *Nature*, 334, 607–609, 1988.
30. M. Ozima, Gases in diamonds. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 17, 361–384, 1989.
31. M. Ozima, S. Zashu, Y. Takigami, and G. Turner, Origin of the anomalous  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  age of Zaire cubic diamonds: Excess  $^{40}\text{Ar}$  in pristine mantle fluids. *Nature*, 337, 226–229, 1989.
32. M. Ozima, S. Zashu, K. Tomura, and Y. Matsuhisa, Constraints from noble-gas contents on the origin of carbonado diamonds. *Nature*, 351, 472–474, 1991.
33. M. Ozima and S. Zashu, Noble gas state of the ancient mantle as deduced from noble gases in coated diamonds. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 105, 13–27, 1991.
34. M. Ozima and S. Zashu, Radiation-induced diamond (carbonado): A possible mechanism for the origin of diamond in primitive meteorites. *Meteoritics*, 26, 382–383, 1991.
35. M. Ozima and N. Wada, Noble gases in atmospheres. *Nature*, 361, 693, 1993.
36. J. Matsuda, M. Sudo, M. Ozima, K. Ito, O. Ohnaka, and E. Ito, Noble gas partitioning between metal and silicate under high pressures. *Science*, 259, 788–790, 1993.
37. M. Ozima, Noble gas state in the mantle. *Rev. Geophys.*, 32, 405–426, 1994.
38. T. L. Daulton and M. Ozima, Radiation-induced diamond formation in uranium-rich carbonaceous materials. *Science*, 271, 1260–1263, 1996.
39. M. Ozima and M. Tatsumoto, Radiation-induced diamond crystallization: Origin of carbonados and its implications on meteorite nano-diamonds. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 369–376, 1997.
40. M. Ozima, R. Wieler, B. Marty, and F. A. Podosek, Comparative studies of solar, Q-gases and terrestrial noble gases, and implications on the evolution of the solar nebula. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62, 301–314, 1998.
41. M. Ozima and F. A. Podosek, Formation age of Earth from  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  and  $^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}$  systematics and the missing Xe. *J. Geophys. Res.*, 104, 25493–25499, 1999.
42. M. Ozima and G. Igarashi, The primordial noble gases in the Earth: a key constraint on Earth evolution models. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 176, 219–233, 2000.
43. M. Ozima, Y. N. Miura, and F. A. Podosek, Orphan radiogenic noble gases in lunar breccias: Evidence for planet pollution of the Sun? *Icarus*, 170, 17–23, 2004.
44. M. Ozima, K. Seki, N. Terada, Y. N. Miura, F. A. Podosek, and H. Shinagawa, Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils. *Nature*, 436, 655–659, 2005.
45. M. Ozima, Q.-Z. Yin, F. A. Podosek, and Y. N. Miura, Toward understanding early Earth evolution: Prescription for approach from terrestrial noble gas and

light element records in lunar soils. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 105, 17654–17658, 2008.

46. M. Ozima, T. K. Suzuki, A. Yamada, and F. A. Podosek, Noble gas isotopic fractionation between solar wind and the Sun, and implications for Genesis solar wind oxygen measurements. *Meteorit. Planet. Sci.*, 47, 2049–2055, 2012.

#### 参考文献

1. M. Ozima, *The Earth: Its Birth and Growth*, First Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 1981. (Russian Edition, Moscow, 1983.)
2. M. Ozima and F. A. Podosek, *Noble Gas Geochemistry*, First Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 1983. (Russian Edition, Moscow, 1987.)
3. M. Ozima, *Geohistory: Global Evolution of the Earth*. Springer-Verlag, Berlin, 1987. (Russian Edition, Moscow, 1990. Brazilian Edition, Brasilia, 1991.)
4. M. Ozima and F. A. Podosek, *Noble Gas Geochemistry*, Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
5. M. Ozima, J. Korenaga, and Q.-Z. Yin, *The Earth: Its Birth and Growth*, Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 2012.