

地球大気の保持について

松 尾 禎 士 (東教大・理)

1. はじめに

惑星としての地球の成因および進化を考えるに当つては、太陽系全体としての成因と進化を絶えず考慮に入れていなくてはならない。太陽にせよ、惑星にせよ、ガスと粒子の粗な集合体から出発して現在に至つたとすると、進化の各段階で化学組成がどのように変化したかを研究することは、特に地球化学者にとつて魅力的な題目である。

そのような研究目的の対象として地球をみた場合、地球の不揮発性成分は地球物質の増加する段階での化学組成の変動はあまりありそうにない。一方、揮発性成分については、凝縮、安定な化合物の形成、あるいは重力による大気としての保持などの諸要素が地球進化の段階に応じて働き、揮発性成分の化学組成の変動に影響を及ぼしたのではないかと想像される。

地球初期の進化段階を研究する手段として、現在の地球および隕石の希ガスの存在比を用いることは、少くとも化学結合の問題をオ一近似として省略できることから当然試みるに値する。本稿では特に希ガスの重力場からの逃散のさい生ずる分別作用を手がかりにして、地球大気中の希ガスと地球の進化との関連をとりあげてみたい。

2. 宇宙および地球における希ガスの存在度

これから論じようとする問題に必要な希ガスの存在度についての情報を集めてみると、それらは意外に貧弱である。

宇宙における希ガスの存在度は多くは内挿によつて求められている。希ガスのイオン化電位は一般に高いため、太陽表面程度の温度では励起が不十分で、分光学的手段によつては太陽表面の希ガスの存在量は求められていない。希ガスの存在量の直接的な測定は二、三の高温星についてしかなされていない。また特に Kr と Xe に関しては、各々内挿によつて求めた値の比が、地球大気の比に近いことを内挿の妥当性の裏づけにしている現状である。また Ne の存在

松尾禎士

度は人によつて factor of ten ぐらいのひらきがある。

地球の希ガスの存在度は大気が主な情報源である。しかし地球内部にまだとどまれている希ガスの量に関しては、ほとんど組織的な研究はない。

オ 1 表に存在度に関するデータを示した。放射壊変生成物、宇宙線による核

オ 1 表 Ne を基準とする希ガスの相対存在度

		Ar *	Kr	Xe
Cosmic abundance	(1)	0.188	5.3×10^{-5}	4.2×10^{-6}
Carbonaceous chondrite (Orgneil)	(2)	1.56	3.2×10^{-2}	7.3×10^{-2}
Chondrite (Fayetteville の暗色部)	(3)	9.32×10^{-3}	1.4×10^{-5}	1.1×10^{-5}
地球大気		2.07	6.1×10^{-2}	4.8×10^{-3}
Thucholite **	(4)	0.07	0.15	0.27

* $^{36}\text{Ar} + ^{38}\text{Ar}$

** $^{21}\text{Ne} / ^{20}\text{Ne}$ の最も低い試料について

() 内の数字は参考文献の番号

破碎反応生成物及びウランなどからの核分裂生成物などの寄与の補正は、データの取捨選択のさいに考慮した。He のデータはこの表からは除いた。また存在度は Ne に対する比で示してある。

オ 1 表にみられる特徴は二つある。オ一は cosmic abundance は $\text{Ne} > \text{Ar}$ であるのに対して carbonaceous chondrite および地球大気では $\text{Ar} > \text{Ne}$ であること。オ 2 は Kr と Xe の関係である。cosmic abundance は先にもべたように地球大気の Kr/Xe が採用されているから $\text{Kr} > \text{Xe}$ である。一方 carbonaceous chondrite および地球にみられる特殊鉱物、Thucholite では $\text{Xe} > \text{Kr}$ であつて例外はない。

オ一の特徴に関しては、核破碎反応生成物の寄与の差によつて $\text{Ar} > \text{Ne}$ となつたとは考えられないので、cosmic abundance を材料とした物質から隕石ないしは地球ができたときに軽い Ne の方がより多く逃げたと考えたくなる。

オ 2 の特徴に関しては、二つの問題が生じてくる。1) cosmic abundance では本来 $\text{Xe} > \text{Kr}$ であり、carbonaceous chondrite あるいは Thucholite

中には cosmic abundance に似た状態が保持されているのか？ もしそうであれば、Xe の cosmic abundance は 10 倍以上高いことになり、abundance curve 上の一つのきわだつたピークの頂点を占めることになる。2) carbonaceous chondrite および Thucholite はともにかなりの量の有機物を含んでいる。cosmic abundance では本来 $Kr > Xe$ であるのならば、これら有機物と Xe は特別に深い関係、例えば Xe の有機化合物を作つて保持されるのに対して Kr でそういうことがないために保持されにくいのであろうか？ Thucholite の場合、Th および U を多量に含んでいるが、fission あるいは中性子の反応による Xe の増加は、この際量的には問題にならない。

さて Suess-Urey (5) によつて経験的に見いだされた abundance rule のうち、「質量数が 50 以上の領域では同重体の存在度の和は、質量数とともに平滑に変化する」が正しければ、先にのべたオーの問題、すなわち Xe の cosmic abundance はもつと高いのではないかという疑問を押しすすめてゆくことは、Xe の同位体がマジックナンバーともほとんど関係がないので、有望ではないようにみえる。

従つて有機物と Xe との強い相互作用により、有機物を含む物体には、Xe が Kr よりもよく保持されたとみる方がよいのでなかろうか。Xe がフッ素と安定な化合物を作ることは今やあまりにも有名であるが、 XeF_2 、 XeF_4 および XeF_6 の融点はそれぞれ $140^\circ C$ 、 $114^\circ C$ および $46^\circ C$ であり(6)、若しこの種の化合物が、accretion process で形成されれば、それらはガスとしてではなく dust としての挙動をしたことであろう。その他 Xe がアルキル化物を形成すること(7)や有機溶媒に極めてよく抽出されること(8)などが知られているが、Kr は Xe に比して化合物は非常に不安定(9)で、Ar、Ne および He に至つては、いわゆる包接化合物(10)しか存在が知られていない。これらの事実はオー2の考えを支持する材料になると考えられる。

Xe のみは場合によつては化学的には "inert" とはいえないので、希ガスの分別作用を物理的要因のみで説明しようとするときは、慎重を期する必要がある。

最近、各種の chondrite について、同一試料中に暗色部と淡色部とがありそれらの化学組成はほとんど同じであるにもかかわらず、前者は多量の希ガス

松尾禎士

を含み後者には少なく、しかも前者は "primordial rare gas" が圧倒的に多く、後者は radiogenic および cosmogenic (核破碎反応生成物) な希ガスのみからなることが報告されている。Signer および Suess (11) は、この問題に対する一つの示唆を提出している。すなわち、暗色部を形成する原始物質が希ガス、特に He および Ne と混り合つたときには、当然 H_2 も多量に存在する条件であつたであろう。そして H_2 が Fe^{II} を還元して少量の金属鉄を作り出しそれらが混合しあつて暗色部ができたというのであるが、それとほぼ化学組成の同一な淡色部で何故 primordial gas が少ないかという点では何らの積極的な説明になつてはいない。筆者の想像では、もし希ガスが有機物の包接化合物として accretion process に参加したとすれば、その後の consolidation の過程での加熱で一部のガスは逃げるが、同時にとりまれた有機物も分解して少量の固体の炭素を残し、それが全体に disperse して暗色部ができたともいえそうである。

一方 Du Fresne および Anders (12) は Pesyanoe achondrite (他の隕石に比べて特にガスの保持量が多く、希ガスの同位体組成に特別な異常はない) について、ガスの保持は隕石中の sulfide, とくに MgS の格子欠陥と関連が深いと結論している。現時点では、隕石は大気を保持しうるほどの大きさの母体からできたとは考えられていないので、彼等は、この隕石の高ガス含量を二次的なガスの付加とガスが MgS の格子内に捕足されたことにより説明しようとしている。ただしこの隕石の場合は $Kr > Xe$ である。

3. 大気からの気体の逃散

Jeans (13)によると、ある気体の root-mean-square velocity, V_m とその気体のおかれている系の脱出速度 V_{esc} の間に $V_m < 0.2 V_{esc}$ の関係があれば、その気体は大気として 10^9 年は安定に存在しうる。ここに V_{esc} は次式で示される；

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{M}{R}} \cdot 11.3 \quad (\text{Km/sec}) \quad (1)$$

ただし M はその天体の地球の質量に対する相対値、 R は半径の相対値である。表 2 に各惑星の脱出速度を示した。

才2表 惑星からの脱出速度 (Km/sec)

水 星	金 星	地 球	月	火 星	木 星	土 星	天 王 星	海 王 星
4.3	10.4	11.3	2.4	5.1	61.0	36.7	22.4	25.5
* (3.4)	(12.0)	(12.0)	(2.4)	(5.8)	(100)	(70)	(54)	(67)

* ()内の値は太陽からの距離と albedo の補正をしたもの

一方、 V_m は、

$$V_m = \sqrt{3kT/m} \quad (2)$$

で示され、温度が高いほど、また質量の小さいガスほど大きい。才3表に希ガスについての $1,000^\circ\text{K}$ の値を示す。

才3表 $1,000^\circ\text{K}$ における希ガスの V_m

	He	Ne	Ar	Kr	Xe
$V_m(\text{Km/sec})$	2.5	1.1	0.8	0.5	0.4

地球の $V_{esc.}$ は 11.3 Km/sec であるから、Ne より重いガスは $1,000^\circ\text{K}$ 程度の isothermal exosphere (脱出圏) からは、地質時代を通じてほとんど逃げないといつてよい。

従つてもし大気から希ガスの逃散が起つたとすれば、当然 exosphere での温度は $1,000^\circ\text{K}$ よりも高い温度であり、しかも質量に依存する効果があらわれるはずである。Spitzer (14), Kuiper (15), Brown (16), Suess (17) らによつてこの問題は一時期、集中的に論じられ、最近 Signer および Suess (11)によつて再びとりあげられた。

Spitzer および Kuiper によると、地球大気からのガスの逃散は、気体運動論によつて次のように表わされる；

$$\ln F = \ln F_0 - \frac{v_e^2}{2} \frac{g}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{m}{kT}\right)^{3/2} dt \cdot e^{-\left(\frac{v_e^2}{2}\right)\left(\frac{m}{kT}\right)} \quad (3)$$

松尾禎士

ここに、 F は fractionation factor, 例を Ar とすると、

$$F_{\text{Ar}} = (\text{Ar/Si})_{\text{terrestrial}} / (\text{Ar/Si})_{\text{cosmic}}$$

である。 F は人によつては depletion factor ともいわれている。 F_0 は fractionation factor の質量に依存しない部分、 v_e は地球の脱出速度、 g は重力の加速度、 m は気体 1 分子の質量、 k はボルツマン定数、 T は isothermal exosphere の温度、および Δt は逃散過程の経過時間である。

F の観測値と m の関係から最小二乗法により F_0 、 T および Δt を求めるのがここでの目的である。まず F の観測値を求めるに当つて、先にのべたように希ガスの地球における存在度および cosmic abundance の両方に不確実な要素があるので、各希ガスの $\log F$ には ± 0.5 程度の巾がありうることを念頭においておきたい。

今、Suess 等の求めた F の観測値、Ne (20+22), Ar (36+38), Kr および Xe についてそれぞれ $10^{-11.26}$, $10^{-8.87}$, $10^{-7.35}$ および $10^{-7.14}$ を用いて式(3)から F_0 、 T および Δt を求めると、それぞれ $F_0 \sim 10^{-7}$, $T = 9 \times 10^4$ °K および $\Delta t \sim 0.3$ day という結果がえられた。

exosphere の温度が 10^5 °K, あるいは逃散過程が数時間しかかからなかつたということは直観的にはうけ入れ難い。そこで $\log F$ に誤差のあることを考慮に入れて T が低くなる方向、すなわち m による F の差が大きくなる方向に修正を施してみると、 $\log F$ で考えられる誤差の範囲内では、 $T \sim 8 \times 10^4$ °K, Δt が 10 日程度のことにかわるだけである。ちなみにかりに T を $5,000$ °K にしてみると 4.5×10^9 年たつても希ガス相互間の質量差による分別は起らないことになる。

ここでえられた結果をそのまま言葉にするならば、先ず地球が形成されるときに揮発性成分（この場合気体）は不揮発性成分（この場合 Si）に対して、材料物質の $1/10^7$ 程度に減少したこと、さらに極めて短時間ではあるが地球大気は 10^5 °K にも達する高温になつたことになる。

もし地球の自転速度が過去では大きく、そのため v_e も 11.3 Km/sec の半分の値であつたとしても exosphere の温度はせいぜい 10^4 °K に下げられるだけである。

気体運動論は原因によつて F の値が規定されたのであれば、地球の大気が保持されるに至つた時期の後で太陽からの shock wave などによつて "瞬間的" に高温になつたことがある筈である。一方、林 (18) によると太陽の進化の極めて初期に複数回の shock wave の発生が考えられている。もし shock wave を出した太陽の進化段階が、地球の進化段階において大気を保持するに至つた時期の後に対応するならば shock wave による加熱はあつてもよいことになる。

しかし林のモデルによると太陽は、それが独立した物質系になつてから現在の状態に至るまでの経過時間は極めて短い (10^7 年) のに対して、地球あるいは隕石母体などの accretion に要する経過時間は 10^8 年の単位であるとされていることから、惑星物質はまだそれらが dust ないしは grain 状であつたときにのみ太陽からの shock wave を受ける機会があつたと考える方がよさそうである。惑星物質が dust の状態のときには、それは到底大気を保持しえない。

さらにもし地球が大気を保持するようになった後に太陽からの shock wave を受ける可能性があつたとすると、単純なみつもりから shock wave のエネルギー発生速度は、現在の太陽の energy production rate の約 10^{10} 倍、 $(\frac{10^5}{250})^4$, にも達することになる。

shock wave のエネルギー発生率に関しては今後の研究にまたねばならないが、もしそのような大きな発生率は考えられないとすると、現在の大気はいわゆる原始大気なるものがすでに強い分別をうけていたものか、あるいは原始大気は特に考える必要はなく、希ガスなども一部は化学的原因によつて grain にとりこまれ、地球が形成されたのちに地質時代を通じて degassing によつて大気が形成されたのか二つの可能性が考えられる。これらの二つの可能性について今後定量的吟味がなされなければならないだろう。

参 考 文 献

- 1) Cameron, A.G.W., (1959), A revised table of abundances of the elements, *Astrophys. J.*, 129, 676.
- 2) Krummenacher, D., et al., (1962), Meteoritic krypton and

- barium versus the general isotopic anomalies in meteoritic xenon, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 26, 231.
- Stauffer, H., (1961), Primordial argon and neon in carbonaceous chondrites and ureilites, *ibid.*, 24, 70.
- 3) Manuel, O. K., and Kuroda, P. K., (1964), Isotopic composition of the rare gases in Fayetteville meteorite. *J. Geophys. Res.*, 69, 1413.
- 4) Bogard, D. D., et al., (1965), Noble gas anomalies in the mineral Thucholite, *ibid.*, 70, 703.
- 5) Suess, H. E. and Urey, H. C., (1965), Abundances of elements, *Rev. Mod. Phys.*, 28, 53.
- 6) Malm, J. G., et al., (1965), The chemistry of xenon, *Chem. Rev.*, 65, 199.
- 7) Field, F. H. and Franklin, J. L., (1961), Reaction of gaseous ions. X. Ionoc reactions in xenon methane mixtures, *J. Am. Chem. Soc.*, 83, 4509.
- 8) Hamaguchi H., et al., (1965), Solvent extraction of xenon, *Nature*, 205, 279.
- 9) Hyman, H. H., (1964), The chemistry of noble gases, *J. Chem. Edu.*, 41, 174.
- 10) Chernick, C. L., (1964), "Compounds" (?) of the noble gases prior to 1962, *ibid.*, 41, 185.
- 11) Signer, P. and Suess, H. E., (1963), Rare gases in the Sun, in the atmosphere and in meteorites, *Earth Science and Meteoritics*, p. 241, ed. by Geiss, J. and Golberg, E. D., (North-Holland, Amsterdam, 1963)
- 12) DuFresne, E. R., and Anders, E., (1962), On the retention of primordial noble gases in the Peysanoe meteorite, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 26, 251.
- 13) Jeans, J., (1916), *Dynamical theory of gases*, (Cambridge

Univ. Press, 1916) .

- 14) Spitzer, Jr., L., (1952) , The terrestrial atmosphere above 300 km, The atmosphere of the Earth and planets, p. 211, ed. by Kuiper, G. P., (Chicago Univ. Press) .
- 15) Kuiper, G. P., (1952) , Planetary atmospheres and their origin, *ibid.*, p. 306.
- 16) Brown, H., (1952) , Rare gases and the formation of the earth's atmosphere, *ibid.*, p. 258.
- 17) Suess, H. E., (1949) , Die Häufigkeit der Edelgase auf der Erde und im Kosmos, *J. Geol. Res.*, 57, 600.
- 18) Hayashi, T., (1966) , private communication.