

大気・海洋の起源と進化*

田 近 英 一**

1. はじめに

大気海洋系の起源と進化に関する研究は以前から盛んに行なわれてきたが、1980年前後を境にして大きな進展がみられた。大気・海洋の起源論は主として惑星形成論の進展に伴い、大気・海洋の進化論は主として物質循環の数値モデリングによる研究の進展に伴い、それぞれより具体的なシナリオが描けるようになってきた。

以下では、80年代以降のそれぞれの研究の進展を概観する。しかしその前に、80年代以前の研究の状況がどのようなものであったかをごく簡単にまとめておきたい(1,2参照)。

2. 80年代以前の研究の概要

地球は原始太陽系星雲の中で誕生したと考えられている。Brown (3)は大気中の希ガスの相対存在度から、地球大気は原始太陽系星雲ガスの名残(一次大気)ではなく、固体地球内部から二次的に脱ガスしたものであると結論した(大気の二次起源説)。脱ガスのメカニズムとして火山活動に注目した Rubey (4)は、地球内部の揮発性成分が火山ガスとして地球史を通じて連続的に脱ガスし、それが徐々に地球表層に蓄積して大気・海洋が形成されたと考えた(連続脱ガス説)。この考え方は、その後も長い間大気海洋形成論の主流であった。大気成分のうちの酸素は生命活動の結果としてもたらされたものであり、Berkner and Marshall (5)は大気中の酸素濃度と生命進化とを結び付けて、酸素の時代的変遷のシナリオを提出した。

一方、暗い太陽のパラドックスと呼ばれる問題がある。恒星進化論によると太陽光度は時間的に増大しており、地球が形成された46億年前には現在の70%程度の明るさしかなかったと推定されている。この場合、もし大気組成が現在と変わらなかったとしたら、今から約20億年前以前の地球は全球凍結していたことにな

る。しかしながら、そのような地質学的証拠は存在しない。Sagan and Mullen (6)は、過去において地球が全球凍結しないためには、温室効果ガスとしてNH₃のような還元気体が大気中に多量に存在すれば良いとした。Urey and Millerの実験(7)で良く知られているように、還元的な大気組成は有機物質の無機的な合成に好都合である。大気中に酸素が蓄積してくることで、大気組成は還元型から酸化型へと進化してきたことになる。

Hart (8)は以上のような枠組に基づいて、太陽進化や生物進化、気候変動等を考慮したはじめての総合的な大気進化モデルを構築し、それまでに得られていた知識と矛盾しないような大気進化のシナリオを求めた。

80年代からの研究の進展は、上述のシナリオに大きな変更を迫ることになった。

3. 大気海洋形成論の進展

Rubeyの連続脱ガス説は、火山活動による現在と同様な脱ガスが地球史を通じて連続的に起こったとしている。しかし、これを否定するような研究結果が次々と提出された。たとえば、Hamano and Ozima (9)は、大気と地球内部における⁴⁰Ar/³⁶Arのデータを用いて地球の脱ガス史の制約を試みた。それによると、地球内部に含まれていたArは地球形成時から数億年以内にその80%以上が脱ガスしなければならないと結論される(初期大規模脱ガス説)。同じ希ガスであるXeの同位体比を用いた研究からも、同様の結論が得られている。

当初は、そのように大規模な脱ガスが一体どのようなメカニズムによって起こったのか不明であった。それは、惑星形成論の進展によって明らかにされた。

現代の惑星形成論によると、地球は微惑星の衝突合体によって形成されたと考えられている。衝突実験や理論的な推定によると、衝突の際の急激な温度圧力上昇によって微惑星中に含まれている揮発性成分(水や二酸化炭素など)が脱ガスするということが分かって

* Origin and Evolution of the Atmosphere and Ocean.

** Eiichi Tajika, 東京大学理学部地質学教室.

きた(10, 11). これは、衝突脱ガスと呼ばれるメカニズムである。

Matsui and Abe は、衝突脱ガスによる原始大気の形成を考慮した地球の集積過程の理論的研究を行なった(1, 12, 13). それによると、衝突脱ガスによって、成長中の原始地球の周囲には主として水蒸気を主成分とする原始大気が形成される。微惑星の衝突によって地表で解放されたエネルギーは、この水蒸気大気の保温効果によって宇宙空間へ効率的に逃げられなくなる。その結果、地表面温度は上昇し、やがて地表はマグマオーシャンに覆われる。マグマオーシャンが形成されると、水蒸気大気自身がシリケートメルト中に溶解することで、集積中の地球の表面温度と水蒸気大気量はほぼ一定(約1200°C, 約100気圧)に調節される。こうした状態は集積末期まで続くが、微惑星の衝突頻度の減少によって、やがて水蒸気大気は不安定になる。原始大気中の水蒸気は凝結し、原始海洋が形成される。また、こうして形成された原始海洋の質量は現在の海洋質量程度になることが示される。Zahnle *et al.* (14) は、その後より現実的なモデルによる再計算を行ない、同様の結論を得た。

Abe and Matsui (15) と Kasting (16) は原始 H₂O-CO₂ 大気の進化についての理論的推定をそれぞれ独立に行なった。それによると、地表面で解放される重力エネルギーフラックスが約 160 W/m² 以下になると原始大気の構造が突然変化し、原始大気中の水蒸気は凝結して原始海洋が形成される。水蒸気が凝結した後は CO もしくは CO₂ や N₂ を主成分とする原始大気が残される。

地球形成直後の大気組成は集積末期においてマグマオーシャン中に金属鉄が存在したかどうかによって異なる(17)、大気中の炭素の総量(CO+CO₂)については少なくとも100気圧程度はあったと推定されている(18)。CO は大気中の水蒸気が光分解されて生成される OH ラジカルによって酸化され、結局は CO₂ になる(19, 20)。CO の消失という問題は、実は生命の起源論に重大な制約を与えるのであるが、そのタイムスケールの推定にはいろいろと課題が多い(21)。

以上が、現在までの大気海洋形成論に関する研究のおおまかな流れである。

4. 大気海洋進化論の進展

一方、初期の地球大気は NH₃ を含むような還元的

なものであったという説も、その後の研究によって否定された。そもそも NH₃ や CH₄ などの還元気体は光化学的に不安定であり、地質学的にきわめて短いタイムスケールでそれぞれ N₂ と CO₂ とに酸化されてしまうというのである(22, 23)。したがって、暗い太陽のパラドックスを解決するためには別の温室効果気体の存在が必要である。

ここでクローズアップされたのが CO₂ である。たとえ太陽が暗くても、過去の大気中に多量の CO₂ が存在すればその温室効果によって地表面を十分温暖に保てることが、1次元放射対流平衡の計算によって示された(24, 25, 26, 27)。したがって、原始大気が CO₂ を主成分とするものになるという前述の結論は、暗い太陽のパラドックスを解決する。

問題は、その後の大気中の CO₂ 量がどのように決まるのかということである。実は、大気中の CO₂ 量は炭素循環によって決まっていることが以前から定性的には知られていた。この問題に関しても80年代に大きな進展がみられた。

炭素に限らず多くの揮発性元素は、地球システムを構成する各サブシステム(大気圏、水圏、生物圏、岩石圏、マントルなど)の間で地球化学的循環を行なっている。大気や海水の組成も、こうした物質循環を通じて決まっていると考えられる。したがって、大気海洋系の進化は連続脱ガスによる物質の蓄積というような単純な枠組ではなく、物質循環というもっと複雑な枠組の中で考えなくてはならない(2)。

Walker *et al.* (28) は、炭素循環を構成するプロセスのひとつである陸面の化学的風化作用が持つ温度依存性に注目し、炭素循環システムは地表面温度に対して負のフィードバック効果を持っていることを示した。地表面温度は CO₂ の温室効果で決まっているとすれば、炭素循環システムが持っているこの特性によって、大気中の CO₂ 量は地表面温度を一定に保つように調節されてきた可能性がある。すなわち、大気の進化は地球環境の進化と密接に関係しているといえる。

Tajika and Matsui (29, 30, 31) は炭素循環の数値モデルによって、太陽光度の時間的増大、テクトニックな活動度の減少、大陸地殻の成長などの外部境界条件の変化に対して、地球システムがどのように応答するかを調べた。その結果、温暖な地球環境を維持するためには現在のような大陸地殻の形成が不可欠であることが示された。また、マントルからの CO₂ 脱ガス率の変動や、炭酸塩岩が大陸地殻上へ付加することで表

層を循環する総炭素量を減少させることなども、大気中の CO_2 濃度の変動に大きな影響を持っていることが分かった。大気中の CO_2 は大規模な大陸地殻が形成された後、はじめて効果的に除去されるようになる。原始大気の主成分であった CO_2 は、地球史を通じて地球環境に対する太陽光度の時間的増大の影響を相殺するように減少してきた可能性が示された。また、炭素循環システムが持つ地表温度に対する負のフィードバック効果のために、さまざまな外的条件の変化にもかかわらず、地表温度はかなり安定に保たれ得ることが示された。Schwartzman and Volk (32) は、このモデルによって推定された安定な地表温度が、風化作用に対する生物の影響を考慮することによってどのように変更されるかについて議論している。

炭素循環の数値モデリングによる研究は、地球史に渡る大気進化の問題だけでなく、最近1億年から6億年間の気候変動や大気中の CO_2 濃度の変化の推定にも用いられている。その代表的なものが BLAG モデルと呼ばれているものである(33, 34)。これらのモデルは、堆積岩中に残された炭素やイオウの同位体比を制約条件として用いることによって、数千万年スケールでの大気中の CO_2 や O_2 の変動の推定を行なっている。それによると、海洋底拡大速度や陸上面積などの変動が CO_2 の脱ガス率や風化による CO_2 の除去を通じて、長期的な CO_2 濃度の変動、すなわち気候変動を支配している。このようなモデルによって推定された顕生代の CO_2 濃度の変動は、さまざまな地質学的研究による過去の CO_2 濃度の推定値と良く一致しており、地表温度の変動は過去の温暖期や氷河時代の交代と良い相関を持っている(35, 36, 37)。また同様に、炭素-イオウ-酸素の物質循環系の数値モデルによって、過去の O_2 濃度の変動の推定も行なわれている(38)。

最近ではさらに、エネルギーバランスモデルによる緯度方向の温度分布や降水量分布の推定と緯度方向の地質帯の分布を考慮したモデルを開発し、トレーサーを用いて物質循環をもっと精密に調べようという試みがなされるようになってきた(39)。また、衝突脱ガスによって形成された原始大気・原始海洋が地球史を通じてどのように進化してきたのかという問題についても、大気・海洋・堆積岩を構成している主要な揮発性元素の物質循環を結合させた総合的な地球システム進化モデルを用いて研究されている(40)。

ところで、現在でも水は地球内部から脱ガスしており、一方では熱水反応によって海洋底に取り込まれた

海水が海洋プレートの沈み込みに伴って地球内部へリサイクルしている。したがって、海水量はこれらのプロセスのバランスによって変動する。海水量の変動はマンツルの熱史と強く結合している可能性があり、地球史の大部分を通じてあまり大きくは変動しなかったかも知れない(30)。また Kasting (41) は、大規模な熱水反応が起こっている中央海嶺の深さがどの海域でも約 2,500 m (圧力が H_2O の臨界点付近)であることに注目し、 H_2O の物性自身が海の深さ(～海水量)を現在と同じ程度に調節してきたのではないかという仮説を提唱している。

5. おわりに

ここでは、大気・海洋の起源と進化に関する主として理論的な研究について解説してきた。もちろん、大気・海洋の進化についての地質学的・地球化学的な研究も進展している。それらについては42を参照して欲しい。

大気海洋系の起源と進化に関する研究は、現在でもなお非常にダイナミックに展開している。したがって現状を把握するための良い教科書はないといえるが、たとえば最近の研究の進展を集めた論文集としては43, 44などがある。また、古典的な教科書としては45, 46などがある。

地球の大気・海洋の起源と進化は、衝突脱ガス+物質循環という枠組みの中で捉えることができるようになった。けれども、そうしたシナリオを定量的に検証していくためには、個々の基礎プロセスの理解や観測データの蓄積がまだ全くといって良いほど不十分である。今後は我が国においても、数値モデリングや地質学、地球化学など各分野の研究者が密接に協力し合っていくような研究体制をつくることが急務であると思われる。

参考文献

- 1) 阿部豊, 松井孝典, 1987: 地球大気の起源と進化. 気象研究ノート, 155, 151-178.
- 2) 田近英一, 松井孝典, 1991: 大気環境からみた惑星地球の変動. 科学, 61, 649-656, 岩波書店.
- 3) Brown, H., 1952: Rare gases and formation of the Earth's atmosphere. In *The Atmospheres of the Earth and Planets*. (Kuiper G. P. ed.), 2nd ed., pp. 258-266, University of Chicago Press, Chicago.
- 4) Rubey, W., 1951: Geologic history of sea water, an

- attempt to state the problem. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 62, 1111-1148.
- 5) Berkner, L. V. and Marshall L. C., 1965 : On the origin of oxygen concentration in the Earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 22, 225-261.
 - 6) Sagan, C. and Mullen G., 1972 : Earth and Mars : Evolution of atmospheres and surface temperatures. *Science*, 177, 52-56.
 - 7) Miller, S. L., 1953: A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, 117, 528-529.
 - 8) Hart, M. H., 1978 : The evolution of the atmosphere of the Earth. *Icarus*, 33, 23-39.
 - 9) Hamano, Y. and M. Ozima, 1978 : Earth-atmosphere evolution model based on Ar isotopic data. In *Terrestrial Rare Gases*, (Alexander Jr. E. C. and Ozima M. eds.), pp.155-171, Japan Scientific Society Press.
 - 10) Lange, M. A. and T. J. Ahrens, 1982 : Impact induced dehydration of serpentine and the evolution of planetary atmospheres. *Proc. 13 th Lunar Planet. Sci. Conf.*, *J. Geophys. Res.*, 87, suppl., A451-A456.
 - 11) Tyburczy, J. A., B. Frisch, and T. J. Ahrens, 1986 : Shock-induced volatile loss from a carbonaceous chondrite : Implications for planetary accretion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 80, 201-207.
 - 12) Matsui, T. and Y. Abe, 1986 : Evolution of an impact-induced atmosphere and magma ocean on the accreting Earth. *Nature*, 319, 303-305.
 - 13) Matsui, T. and Y. Abe, 1986 : Impact-induced atmospheres and oceans on Earth and Venus. *Nature*, 322, 526-528.
 - 14) Zahnle, K. J., J. F. Kasting, and J. B. Pollack, 1988 : Evolution of a steam atmosphere during Earth's formation. *Icarus*, 74, 62-97.
 - 15) Abe, Y. and T. Matsui, 1988 : Evolution of an impact-generated H₂O-CO₂ atmosphere and formation of a hot proto-ocean on Earth. *J. Atmos. Sci.*, 45, 3081-3101.
 - 16) Kasting, J. F., 1988 : Runaway and moist greenhouse atmospheres and the evolution of Earth and Venus. *Icarus*, 74, 472-494.
 - 17) Holloway, J. R., 1988 : Planetary atmospheres during accretion : The effect of C-O-H-S equilibria. *Abstract of Lunar Planet. Sci. Conf. XIX*, 499-500.
 - 18) Abe, Y., 1988 : Abundance of carbon in an impact-induced proto-atmosphere. *Proc. 21st. ISAS Lunar Planet. Symp.*, 238-244.
 - 19) Kasting, J. F., K. J. Zahnle, and J. C. G. Walker, 1983 : Photochemistry of methane in the Earth's early atmosphere. *Precam. Res.*, 20, 121-148.
 - 20) Kasting, J. F., J. B. Pollack, and D. Crisp, 1984 : Effect of high CO₂ levels on surface temperature and atmospheric oxidation state of the early Earth. *J. Atmos. Chem.*, 1, 403-428.
 - 21) Kasting, J. F., 1990 : Bolide impacts and the oxidation state of carbon in the Earth's early atmosphere. *Origins of Life*, 20, 199-231.
 - 22) Kuhn, W. R. and S. K. Atreya, 1979 : Ammonia photolysis and the greenhouse effect in the primordial atmosphere of the Earth. *Icarus*, 37, 207-213.
 - 23) Kasting, J. F., 1982 : Stability of ammonia in the primitive terrestrial atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 87, 3091-3098.
 - 24) Owen, T., R. D. Cess, and V. Ramanathan, 1979 : Enhanced CO₂ greenhouse to compensate for reduced solar luminosity on early Earth. *Nature*, 277, 640-642.
 - 25) Kuhn, W. R. and J. F. Kasting, 1983 : Effect of increased CO₂ concentrations on surface temperature of the early Earth. *Nature*, 301, 53-55.
 - 26) Kasting, J. F. and T. P. Ackerman, 1986 : Climatic consequences of very high carbon dioxide level in the Earth's early atmosphere. *Science*, 234, 1383-1385.
 - 27) Kasting, J. F., 1987 : Theoretical constraints on oxygen and carbon dioxide concentrations in the precambrian atmosphere. *Precambrian Res.*, 34, 205-229.
 - 28) Walker, J. C. G., P. B. Hays, and J. F. Kasting, 1981 : A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 86, 9776-9782.
 - 29) Tajika, E. and T. Matsui, 1990 : The evolution of the terrestrial environment. In *Origin of the Earth*. (Newsom H. E. and J. H. Jones eds.), pp. 347-370, Oxford Univ. Press, New York, N. Y., 378pp.
 - 30) Tajika, E. and T. Matsui, 1992 : Evolution of Terrestrial Proto-CO₂-Atmosphere Coupled with Thermal History of the Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113, 251-266.
 - 31) Tajika, E. and T. Matsui, 1993 : Degassing History and Carbon Cycle : From an Impact-induced Steam Atmosphere to the Present Atmosphere. *Lithos.* (in press).
 - 32) Schwartzman, D. W. and T. Volk, 1991 : Biotic enhancement of weathering and surface temperatures on Earth since the origin of life. *Palaeogeogra-*

- phy, *Palaeoclimatology, Palaeoecology* (Global and Planetary Change Section), **90**, 357-371.
- 33) Berner, R. A., A. C. Lasaga, and R. M. Garrels, 1983 : The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *Am. J. Sci.*, **283**, 641-683.
- 34) Lasaga, A. C., R. A. Berner, and R. M. Garrels, 1985 : An improved geochemical model of atmospheric CO₂ fluctuations over past 100 million years. In *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂ : Natural Variations Archean to Present*, (E. T. Sundquist and W. S. Broecker, eds.), pp.397-411. AGU, Washington, D. C.
- 35) Berner, R. A., 1990 : Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time. *Science*, **249**, 1382-1386.
- 36) Berner, R. A., 1991 : A model for atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *Am. J. Sci.*, **291**, 339-376.
- 37) Berner, R. A., 1992 : Palaeo-CO₂ and Climate. *Nature*, **358**, 114.
- 38) Lasaga, A. C., 1989 : A new approach to isotopic modeling of the variation of atmospheric oxygen through the Phanerozoic. *Am. J. Sci.*, **289**, 411-435.
- 39) François, L. M. and J. C. G. Walker, 1992 : Modeling the Phanerozoic carbon cycle and climate : Constraints from the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr isotopic ratio of seawater. *Am. J. Sci.*, **292**, 81-135.
- 40) Tajika, E. and T. Matsui, 1993 : Evolution of the Atmosphere of the Earth. *Proc. 25th ISAS Lunar Planet. Sci. Symp.*, 178-183.
- 41) Kasting, J. F. and N. G. Holm, 1992 : What determines the volume of the ocean ? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**, 507-515.
- 42) Holland, H. D., 1984 : *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans*. Princeton Univ. Press, Princeton, 582pp.
- 43) Matthews, M. S., J. B. Pollack, and S. K. Atreya, eds., 1989 : *Origin and Evolution of Planetary and Satellite Atmospheres*. Univ. of Arizona, Tucson, 881pp.
- 44) Gregor, C. B., R. M. Garrels, F. T. Mackenzie, and J. B. Maynard eds., 1988 : *Chemical Cycles in the Evolution of the Earth*. John Wiley & Sons Inc., New York, 276pp.
- 45) Holland, H. D., 1978 : *The Chemistry of the Atmosphere and Oceans*. Wiley, New York. 351pp.
- 46) Walker, J. C. G., 1977 : *Evolution of the Atmosphere*. Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 318pp.
-