

1. 地球環境の変遷：比較惑星学の視点から

阿 部 豊*

1. はじめに

地球古気候理解の発展史は、大きな環境変化の発見の歴史であった。約150年前に氷期の存在が提唱されて以来、多くの気候変動の発見が続き、最近では完全な凍結状態に陥ったこともあったのではないかと考えられるに至っている。過去の環境が明らかになればなるほど、地球環境変化の振幅、規模、速さとも、いずれもそれ以前に考えられたものよりも大きなものであったことが明らかになるようだ。未知の変動機構が隠されている可能性もあるだろう。

太陽系内の他の惑星での環境変遷と、地球の環境変遷を比較してみることは、おそらく、地球環境の変動特性を理解する上で有用であるに違いない。ここでは、火星や金星の環境変遷と地球の環境変遷を比較し、地球環境の変遷の特徴を考えたい。

2. 地球環境変遷の概略

地球は、その形成とほぼ同時に大気と海洋を持ったと考えられる。初期の地球大気組成は詳しくはわからない。地球大気はその主成分が隕石などの固体惑星材料物質から供給されたと考えられている。従来の考えでは、隕石から供給されるガスは、例えば二酸化炭素、水蒸気といった酸化的な気体を多く含むと考えられてきた。しかし、非常に酸化的な材料と考えられている炭素質隕石でさえも、実は含まれている炭素を全て二酸化炭素に酸化するには酸素の量が不足している。また、惑星形成過程では、現在はコアを形成している金属鉄と大気物質とが反応した可能性が高く、その場合、金属鉄によって大気が還元される。このことから、地球の形成と同時にできた大気はかなり還元的

な大気であり、水蒸気、二酸化炭素の他に、水素、一酸化炭素やメタンもかなりの量含んでいた可能性がある。筆者らは考えている (Hashimoto *et al.*, 2007)。しかし、具体的な組成の定量的推定はまだできていない。

形成後数億年間は「隕石重爆撃期」と呼ばれる天体衝突の頻度が高かった時代である。この時代に数百 km スケールの天体衝突によって海洋が蒸発した可能性があると考えられる (Sleep and Zahnle, 1998)。海洋が蒸発したとしても長くても数千年以内には凝結して海が再生すると考えられるから、これは比較的短時間の変動といえる。一方、より小規模の天体衝突も物質的、熱的に大気の組成や運動に影響をもたらしたはずである。天体衝突頻度は推定にかなり幅があるが、非常に大きいものであった。最近数万年の間、地球上では直径 4 km を超すクレーターは形成されていないはずである。しかし40億年前頃には、このサイズのクレーターが地球全体で1000年間に2個から40個ほどの頻度で形成されたと考えられる。直径 4 km というのは決して大きいサイズではないが、大規模な火山噴火よりも大きな環境影響を与える。衝突頻度が高めの見積りの場合には当然のことながら、また仮に低めの見積りであったとしても、衝突が環境へ及ぼした影響は非常に大きかったと考えられる。しかし天体衝突の環境影響はまだ十分理解されていない。

その後、原始大気から水素の散逸に伴って還元的成分が取り去られ、また二酸化炭素が炭酸塩の形成によって除去され、さらに生物の光合成活動により大気中に遊離酸素が蓄積することによって現在の地球大気組成へと変遷したと考えられる。酸素増大の時期について、通常受け入れられているのは約20億年前という説であるが、諸説あり、確定したものとは言えない。20億年前頃には全球凍結イベントがあったとも考えられている。両者の問題については本誌の田近氏による

* 東京大学大学院理学系研究科。

© 2007 日本気象学会

解説を参照されたい。

大気中の二酸化炭素の量は基本的には炭素循環によって支配されていると考えられている。これは、地球内部から脱ガスする二酸化炭素量と、化学風化を通じて固定される二酸化炭素量が、100万年程度の時間スケールではほぼ釣り合っているというものである。化学風化の速度は大気中の二酸化炭素量や気温に強く依存するので、長い時間スケールのもとでは、大気中の二酸化炭素量や気温も地球内部からの脱ガスによって支配されることになる。この二酸化炭素量の変遷が、数億年スケールでの大気環境の変遷を支配すると考えられている。例えば、中生代はプレートの拡大速度が大きく、それに伴って脱ガス量も多かったことが当時の温暖な環境をもたらしたらしい。

テクトニックな活動度の変化、また大陸配置の変化によって、地球は過去何回かの氷河時代を経験している。氷河時代には極域に万年雪・氷で覆われた地域が存在する。現在は第三紀後半以来の氷河時代である。氷河時代には氷期と間氷期の交代がおこることがあり、最近100万年ほどは約10万年の周期の交代が卓越している。このタイムスケールでは、いわゆる「ミランコビッチメカニズム」といわれる、地球の公転軌道要素および自転軸の変動に起因した日射量の時間空間分布の変動が環境変動の重要な要因となってくる。また、この時間スケールでは、氷床や海洋の加重の変化に伴う、地殻のアイソスタシーによる上下変位も関与している。さらに、原因は未だ分からないが、氷期・間氷期変動に伴って二酸化炭素量も変動することが知られている。これには、生物圏の変化も関わっていることが考えられる。

なお、100万年よりも前は、氷期・間氷期変動にて、10万年の周期ではなく、4万年周期が卓越していたことが知られている。この変動時間スケールの遷移は「第四紀遷移」と呼ばれるが、地球表層システムに内在する何らかの遷移と考えられ、その原因の解明は重要な課題である。

さらに短いタイムスケールでも様々な環境変遷・気候変動が見られるが、これは大気海洋システムに内在する変動現象と考えられる。

3. 火星の環境変遷

次に火星についてみてみよう。火星は過去に大きな環境変動が生じたことが知られている惑星である。現在の火星は、気温は中緯度の夏などではそれほど低く

はないが、平均気圧が低く、液体の水は存在できない環境にある。また、二酸化炭素極冠の季節的な拡大縮小に伴って、大気圧が30%程度も変化することもよく知られている（第1表）。

一方、惑星探査によって、河川状の地形、大洪水地形、クレーターなどの凹地に見られる堆積物など、かつての流水の存在を示唆する地形が見いだされてきた（例えば、Carr, 1996）。これから、「火星はかつて地球のように温暖湿潤であったが、徐々に寒冷化して現在のような状況になった」と考えられてきた。しかし、1990年代に入り、過去の火星を温暖湿潤な状態にすることが理論的に難しいことが示された（Kasting, 1991）。太陽は徐々にその光度を増しているから、過去の火星は現在よりもさらに弱い太陽光しか受けていなかったはずで、温暖湿潤な環境を作るには強い温室効果が必要である。大量の二酸化炭素が存在すれば温暖になり得るが、過去の火星環境では二酸化炭素自体が凝結するために温室効果が維持できないというのである。これから、流水地形は必ずしも温暖湿潤環境を意味せず、低温の氷に覆われた環境下で作られたのではないか、という考えも出てきた（例えば Carr, 1996）。

一方、二酸化炭素が凝結しても他の温室効果気体や二酸化炭素の雲の温室効果で温暖になる（Forget and Pierrehumbert, 1997）という説も出てきた。過去の火星が温暖だったか寒冷だったか、意見が分かるところとなった。

昨年、火星に到達した Mars Exploration Rover の観測は、水が関与した過程の痕跡を検出したことは確かである[†]。これから、「過去の火星が地球のように温暖湿潤であった」とまでは結論づけられないまでも、温暖湿潤環境がある期間存在したことは示唆される。

かつて液体の水が存在したと言うことは、単に現在よりも温暖であったということではなく、大気圧も現在よりも高かったことを意味し、現在とは明らかに異なる環境にあったことは間違いがない。

火星の気候が変化していることは確かであるにしても、いつの時代にどのような気候であったかは必ずしも明らかではない。一般的には温暖湿潤環境は非常に古い時代、「隕石重爆撃期」とほぼ同じ時代であった

[†] Science Special Issue, 2004a : Spirit at Gusev crater, Science, 305, 793-845 ; Science Special Issue, 2004b : Opportunity at Meridiani planum, Science, 306, 1697-1756.

第1表 地球型惑星大気と比較 [阿部・中村 (1997) を簡略化].

天体名	地球	金星	火星
地表気圧 (Pa)	101300	9200000	560*
地表温度 (K)	288	735.3	210
温度範囲 (K)	210~310		140~300
大気組成 (主成分)	N ₂ 78.08%	CO ₂ 96.5±0.8%	CO ₂ 95.32%
(0.1%以上)	O ₂ 20.95%	N ₂ 3.5±0.8%	N ₂ 2.70%
	Ar 0.93%		Ar 1.60%
	H ₂ O 0~2%*		O ₂ 0.13%
	H ₂ O ~3×10 ⁷ Pa (海水)		
	CO ₂ (5~10)×10 ⁶ Pa (石灰岩)		
D/H	(1.5576±0.0005)×10 ⁻⁴	1.6±0.2% ⁽¹⁾	(9±4)×10 ⁻⁴⁽²⁾
³ He/ ⁴ He	(1.399±0.013)×10 ⁻⁶	1.9±0.6% ⁽²⁾	(7.8±0.3)×10 ⁻⁴⁽²⁾
¹² C/ ¹³ C	89.01±0.38	86±12 ⁽²⁾	90±5 ⁽⁴⁾
		88.3±1.6 ⁽³⁾	
¹⁴ N/ ¹⁵ N	272.0±0.3	273±56 ⁽¹⁾	170±15 ⁽⁴⁾
¹⁶ O/ ¹⁷ O	2681.80±1.72		2655±25 ⁽²⁾
¹⁶ O/ ¹⁸ O	498.71±0.25	500±25 ⁽¹⁾	490±25 ⁽⁴⁾
		500±80 ⁽²⁾	545±20 ⁽²⁾
²⁰ Ne/ ²² Ne	9.800±0.080	11.8±0.7 ⁽¹⁾	
²¹ Ne/ ²² Ne	(2.899±0.025)×10 ⁻²		
³⁵ Cl/ ³⁷ Cl	3.1273±0.1990	2.9±0.3 ⁽²⁾	
³⁶ Ar/ ³⁸ Ar	5.320±0.002	5.56±0.62 ⁽¹⁾	5.5±1.5 ⁽⁴⁾
		5.08±0.05 ⁽³⁾	
⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	296.0±0.5	1.03±0.04 ⁽¹⁾	3000±500 ⁽⁴⁾
		1.19±0.07 ⁽³⁾	

* 変動する

(1) パイオニアビーナス (2) 赤外分光 (3) ヴェネラ11/12 (4) ヴァイキング

と考えられている。しかし、必ずしもその時代に限られるものではなく、後の時代にも流水地形が形成されたという証拠もある。このことから、最近では、火星の環境変化は単調に温暖湿潤から寒冷乾燥へと遷移したのではなく、むしろ何回かの温暖湿潤状態の波があったのではないかと考える研究者が増えている。

既に述べたように、温暖湿潤状態では大気圧が高かったはずだから、このような環境変動の波もまた大気量の変動を伴ったはずである。大気量が変動する機構として、散逸、地殻との気体交換、マントルからの脱ガスなどが考えられる。火星大気の水素/重水素比が地球より高い(第1表)ことから、一部は散逸したことは確かであろう。一方、地殻など惑星内部に閉じこめられた可能性も否定できない。繰り返し変動する機構としては、一方向的に減ってしまう散逸より、内部に閉じこめられる方が都合がよいのかもしれない。いずれにせよ、このような変動の原因についてはわかっていない。

最近注目されている火星環境変動の原因に、自転軸

傾斜の変動がある。これについては後で述べたい。

4. 金星の環境変遷

金星の過去の環境変動は明らかではない。現在みることができる金星表面は数億年前よりも新しいものであることが知られているが、その中には直接的に過去の環境が大きく変動したことを示すものは知られていない。しかし、金星では大規模な水の散逸が想定されてきた。金星が地球と同程度に水を含んでいたと考えるべき証拠は実は存在しないのだが、金星大気中に水蒸気が少ないこと、重水素/水素比が地球の100倍であること(第1表)から、大規模な水の散逸が起こったと考えることが一般的である。大規模な水の散逸が起こったのであれば、これは金星が経験した最も大きな環境変動であったはずである。

水の散逸に関しては、従来から「ハイドロダイナミックエスケープ」という機構が想定されてきた。これは現在の紫外線強度では起こらないが、太陽が若かった時代の強い極端紫外線によって大気上層の水蒸

気が分解されるとともに水素が散逸したというものである。このとき、水蒸気の分解で酸素が生じるが、大量の遊離酸素ができると分解産物の水素と結合して分解反応が進まなくなり、散逸も抑えられてしまう。1つの考えは酸素も水素とともに散逸するという考えで、この場合には紫外線強度は水素だけを散逸させるよりも大きなものが必要になる。いずれにせよ、ハイドロダイナミックエスケープが起こるためには強い紫外線強度が必要である。それに加えて大気上層部に水蒸気がたくさんあることが必要である。後者の要素は地球との比較を考える上で重要である。

5. 大気量の変動

火星・金星とも大気量の大きな変化が示唆されている。一方、地球に関しては大気量の変動は明らかではない。少なくとも大気圧が大きく変化したことを示唆する証拠はない。なぜ、他の惑星では大きく大気量が変わったらしい兆候があるのに、地球ではそれが見られないのか？ 地球の環境変動だけを見ていると見落としがちな視点ではあるが、これは重要な地球環境変遷の特徴である。大気量変動がないということは最も基本的なレベルで環境が安定していることとらえることもできよう。この理由について、少し考えてみたい。

大気量変動の原因は、惑星内部と大気の間での気体交換と、宇宙空間への大気散逸である。大気量が変動するには大気の下側か上側の境界を越えての物質輸送が必要だからである。

地球で水蒸気の大規模散逸が起こらなかった理由は、上層大気の水蒸気量が少なかったためであると考えられる。太陽の紫外線を受ける量は金星の半分程度であるが、この違いは大規模な散逸を起こさせたり起こさせなかったりするほどの差ではない。分解されて散逸する水蒸気自体が少なかったことのほうが遙かに大きな影響を持っていたであろう。地球で上層大気の水蒸気量が少ないのは、対流圏界面の温度が低いためにそこで水蒸気が凝結してしまう、いわゆる「コールドトラップ効果」によるもので、地球の大気構造に依っている。この効果は太陽放射が2倍大きければ容易に消えてしまうもので、金星軌道では働かなかったはずである。

また、大気散逸が起こりにくいもう1つの理由は地球が大きいためである。地球や金星に比べて、質量が1/10程度しかない火星では、大気は簡単に重力の束縛を逃れることができ、そのことが火星大気減少の1つ

の要因と考えられている。

火星で想定されるような地殻と大気物質交換による大気量変動が地球で生じなかった要因としては、大気組成の違いが考えられる。地球大気は窒素大気であるが、火星・金星の大気は二酸化炭素大気である。二酸化炭素は炭酸塩という形で固定され得る。それに対して窒素は適当な固体としての固定形態がない。また、純物質としての凝結も、二酸化炭素の方が窒素よりはずっと高い温度で起こる。このことから地球が窒素大気であることは、少なくとも火星大気に比べて変動要因が少ないことを意味していると思われる。一方、火星・金星でも二酸化炭素の次に多い気体は窒素で、地球の窒素大気は二酸化炭素が固定されきってしまった姿、と見ることができる。こうなった原因としては地球に液体の水が存在し、効率的に炭酸塩を合成するとともに、プレートテクトニクスを介して大陸という貯蔵庫にそれを蓄積できることが重要であったのであろう。地球は進化の早い段階で固体地球との気体交換による大気量変動が行き着くところまでいってしまった結果、その後の変動が小さかったと考えることができる。

6. 地球と惑星の環境変動

他の惑星と比較したとき、地球における環境変動のメカニズムのあるものは共通であり、あるものは全く違っていることが予想される。例えば、大気海洋系に内在する振動に起因するような比較的短周期の環境変動は、海洋がない他の惑星では全く違ったものであるはずである。

非常に長い時間スケールでの、惑星内部の過程に関わるような変動は、他の惑星でも起こり得る変動であって、共通要因と見なすことができよう。しかし、これには個々の惑星のテクトニクスの違いが重要な役割を果たしており、テクトニクスの違いの原因を究明しないと話が進まない。生物がらみの変動は、もしかすると火星にはかつて生き物がいたのかもしれないが、地球固有のものと考えておくのが今のところは無難であろう。

氷期・間氷期変動そのものは他の惑星では今のところ知られていない。しかし、この背景にあるような軌道要素の変動はどの惑星でも基本的にはあるものであり、要因としては共通であると考えことができよう。以下では軌道要素変動に関わる問題について述べよう。

7. 自転軸の変動

地球の場合、自転軸傾斜角（地球の公転面の法線と自転軸のなす角）は約4万年の周期で、約1度変化することが知られている。この変化は微小であるが、しかし、氷期・間氷期といったレベルでの環境変動を引き起こす要因と考えられている。最近100万年ほどは氷期・間氷期のサイクルは主に10万年程度の周期性を持っているが、それ以前の時代や、多くの地質学的記録では4万年の周期性が顕著な時代が知られていて、この自転軸変動が重要な要因であることは確かだろう。

自転軸傾斜変動は、実は自転軸の傾斜が変動すると言うよりは、地球の公転面の傾斜が変動するものであり、その周期は太陽系の惑星全体としての力学的な固有周期と歳差運動の周期から導かれる。その意味において、程度の差こそあれ、どの惑星も似たような自転軸傾斜の変動を経験すると考えられる。

しかし、火星の場合にはやや状況が異なっている。それは、火星の場合、公転面傾斜が変化する周期と、自転軸の歳差運動の周期が近いためである。両者の周期が近いことで共鳴が起り、公転面の変動幅以上に大きく自転軸傾斜そのものが変化するはずなのである。この結果、火星の自転軸傾斜は1度程度の振幅ではなく数十度の変動幅を持って変化すると考えられている。この現象は、火星の気候変動を理解する上で非常に重要な要素の1つとして、最近ではこれに関連した研究が非常に多くなっている。

筆者は最近、自転軸傾斜が大きい場合の気候に関心を持って、モデル実験を行った。それによると、自転軸傾斜が大きくなると、自転軸傾斜が小さい場合とは異なる気候モードにはいるらしいことが分かってきた(Abe *et al.*, 2005)。火星ではこの気候モード遷移を経験した可能性があるのである。

地球と火星の自転軸傾斜変動の性質の違いは基本的には歳差運動の周期の違いである。地球の場合、歳差運動の周期が2万年程度と短く、公転面変動との共鳴が起らないのである。地球で歳差周期が短い理由は月の存在によっている。地球の歳差は太陽と月の潮汐力によるが、およそ2倍、月の効果が太陽の効果よりも大きい。この月の効果がなければ歳差周期は長くなり、公転面変動の周期の1つと近いものになると考えられている。これが月の形成が地球環境を安定化していると言われる理由である。

一方、金星はほぼ直立した自転軸で、公転方向とは

逆行自転している。逆行自転では歳差の周り方も逆向きになるため、公転面傾斜の変動と共鳴することはなく、そもそも大きな自転軸傾斜変動が起りえない。しかし、最近では、非常に重い大気と惑星本体の角運動量交換によって、自転軸傾斜が垂直に保たれているという考えが提出された(Correia and Laskar, 2001など)。これがどれほど力学的に妥当なものであるか、詳しい検討を要すると筆者は考える。しかし、自転軸変動が大気循環や気候に大きな影響を与える一方で、大気運動が自転軸傾斜にある条件下では影響を与え得るとするならば、その両者の結合でどのような状態が実現されるのか、結合系としての検討が必要であることは確かであろう。

8. まとめ

地球と他の惑星の環境変動について考えてみた。過去の地球環境の変遷を見ると大気量の変動がない、という特徴が見られた。このため最も基本的レベルで地球の環境は安定していると考えられる。その安定性の背景には、地球のサイズが大きいこと、早い時期から海が存在し、プレートテクトニクスが働き続けていることがあるようだ。

一方、普遍的な気候変動の要因として、軌道要素の変動があり、それは各惑星で共通の要素である。しかし、その現れ方は大きく異なり、大気の運動自体が自転軸傾斜変動に影響して、結果として大気環境を自律的に支配する可能性も考えられる。この問題は今後の重要な検討課題であると思われる。

参考文献

- Abe, Y., A. Numaguti, G. Komatsu and Y. Kobayashi, 2005 : Four climate regimes on a land planet with wet surface : Effects of obliquity change and implications for ancient Mars, *Icarus*, **178**(1), 27-39.
- 阿部 豊, 中村正人, 1997 : 惑星大気・惑星磁気圏, 比較惑星学, 第4章, 松井孝典編, 岩波書店, 233-365.
- Carr, M. H., 1996 : *Water on Mars*, Oxford University Press, 229pp.
- Correia, A. C. M. and J. Laskar, 2001 : The four final rotation states of Venus, *Nature*, **411**, 767-770.
- Forget, F. and R. T. Pierrehumbert, 1997 : Warming early Mars with carbon dioxide clouds that scatter infrared radiation, *Science*, **278**, 1273-1276.
- Hashimoto, G., Y. Abe and S. Sugita, 2007 : The chemical composition of the early terrestrial atmosphere :

- Formation of reducing atmosphere from CI-like material, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Kasting, J. F., 1991 : CO₂ condensation and the climate of early Mars, *Icarus*, **94**, 1-13.
- Sleep, N. H. and K. Zahnle, 1998 : Refugia from asteroid impacts on early Mars and the early Earth, *J. Geophys. Res.*, **103**(E12), 28529-28544.
-