



放射性熱源と惑星の進化

田近 英一

Tajika Eiichi

1. 地球の年齢

今から約 150 年前、イギリスの物理学者ウィリアム・トムソン（通称ケルヴィン卿）は、熱伝導理論を用いて地球の年齢の推定を行った。地球は熱く熔融した状態で誕生し、その後は熱伝導によって冷却して現在に至ったと考え、現在の状態になるまでの時間を求めると、数千万年程度（2,000 万年～4 億年）という解が得られた。したがって、地球は今から約数千万年前に誕生したということになる。数千万年という時間スケールは、日常感覚からすれば非常に長い。地層の形成や隆起、褶曲、浸食、変成などといった地質学的プロセスやヒトへと至る生命の進化に必要と思われる時間感覚からすると、必ずしも十分長いとはいえない。ダーウィンははじめ、当時の地質学者や生物学者は、この推定結果に強い違和感を覚えていた。

21 世紀を生きる私たちは、地球が約 45 億 5,000 万年前に誕生したことを知っている。ケルヴィン卿の行った物理学的推定は、どこが間違っていたのだろうか？ 実は、彼は当時、地球の進化を考える上で決定的な役割を果たす要因を知らなかったのである。それは、放射性元素の存在であった。

2. 地球の熱進化

地球や惑星の進化とは何かを一言で表すなら

ば、“冷却過程” だといえる。すなわち、地球や惑星の内部は、時間とともに徐々に冷却していき、ついには火成活動が起こらない、冷たく死んだ天体となる。このような、惑星の冷却の歴史のことを、熱史又は熱進化という。地球や惑星の熱進化は、惑星進化の本質である。その熱進化において、放射性元素は決定的な役割を果たしている。すなわち、“内部熱源” としての役割である。

自然界では岩石に含まれている放射性元素が、その半減期に応じて自発的に放射性壊変を起こす。放射性元素が崩壊する際には崩壊熱が放出される。岩石に含まれている放射性元素は微量ではあるが、地球全体でみるとその崩壊熱は膨大なものとなる。

地球内部の岩石には、様々な放射性元素が含まれているが、地球の進化を考える上で重要なものは、半減期が非常に長く（数十億年～100 億年程度）、崩壊熱が大きいこと、すなわち岩石中に含まれているその元素の濃度及び放射性同位元素の存在度が高い必要がある。そうした条件を満たす、地球の熱進化に重要な放射性元素は、 ^{40}K 、 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th の 4 つである（表 1 及び図 1）¹⁾。これらの放射性元素の崩壊によって、地球内部は加熱されている。これら内部熱源の存在によって、岩石惑星は単純には冷却せず、長期にわたって活動的な惑星として

表 1 地球の熱史に重要な放射性元素¹⁾

同位体	崩壊熱 (10^{-5} W/kg)	半減期 (億年)	濃度 (10^{-9} kg/kg)
^{238}U	9.46	44.7	30.8
^{235}U	56.9	7.04	0.22
^{232}Th	2.64	140	124
^{40}K	2.92	12.5	36.9

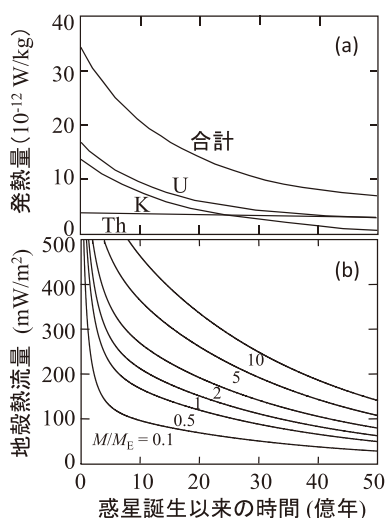


図 1 (a) 放射性熱源による発熱率の時間変化, (b) 熱進化計算による地殻熱流量の時間変化⁴⁾
惑星質量 (M) が地球質量 (M_E) の 0.1~10 倍の場合について示す

存在することができる。

ケルヴィン卿が地球の年齢を推定した当時、放射性元素はまだ発見されていなかった。だから、彼は内部熱源による加熱の効果を考慮せず、単に熱伝導で地球が冷却した場合の計算を行ったのである。しかし、放射性元素の発熱効果を考慮すると、地球内部はなかなか冷却せず、数十億年間にわたって高温状態が維持されるという結果が得られる。

惑星内部の温度が十分に高ければ、岩石は熔融してマグマが発生する。すると、岩石に含まれていた水や二酸化炭素などがマグマに濃集して、火山ガスとして大気中に放出される。このおかげで、地球では物質循環が生じ、温暖湿潤

気候が長期にわたって維持されているのである^{2,3)}。地球は、正に放射性元素のおかげで、現在でも活動的な惑星でいられるのである。

ちなみに、地球の年齢を決めることができたのは、20 世紀に入り、やはり放射性元素の壊変を利用した放射年代測定法が確立されたからであった。すなわち、放射性元素は地球の進化を議論する際、二重の意味でなくてはならない存在なのである。

3. スノーボールアースイベント

地球は少なくとも 3 度にわたって全球凍結したことが知られている。それは、今から約 23 億年前、約 7 億年前、約 6 億 5,000 万年前のことであり、スノーボールアース（全球凍結）イベントと呼ばれている²⁾。これらの時期には、赤道直下の陸地が氷に覆われていたことを示す地質学的証拠が発見されている。地球は当時、表面全体が厚い氷に覆われていたのである。

全球凍結した地球は、数百万～数千万年にわたって、陸も海も全て氷で覆われる。年平均気温は赤道から極に至るまで -40°C という超寒冷気候となり、水は液体状態では存在できない。液体の水がなければ、生命は生存することができない。したがって、例えば光合成を行う真核藻類が、どうやってスノーボールアースイベントを生き延びたのか、大きな謎となっている。恐らくは、地熱の高い火山地域に形成された温泉など、局所的に液体の水が存在する場所があったに違いない、と考える研究者は多い。

大変興味深いことに、全球凍結といっても、海洋は表層 1,000 m 程度が凍結しただけで、深層水は凍ってはいなかったと考えられている。すなわち、氷の下には液体の水を湛えた“内部海”が存在していたことになる（図 2）。なぜ全球凍結下の地球に内部海が存在していたのか。実は、これも内部熱源のおかげなのである。

地球内部は高温状態にあるため、地表面との間に大きな温度勾配が形成される。したがって、温度の高い地球内部から地球表面に向かっ

て熱が流れ出している。これを地殻熱流量と呼ぶ。現在、地球表面全体の平均的な地殻熱流量は約 87 mW/m^2 であり、これに地球の表面積を乗じると、地球全体として $4.43 \times 10^{13} \text{ W}$ という大きさの熱流量が、最終的に宇宙空間に散逸していることになる¹⁾。

今、海洋表面が厚さ $1,000 \text{ m}$ の氷で閉ざされたと考えてみる。すると、氷の層は熱伝導でしか熱を輸送できないため、氷の熱伝導率によって、地殻熱流量を輸送できる氷の厚さは一意に決まってしまう。当時の地殻熱流量が 100 mW/m^2 程度であると仮定すると、氷の厚さは $1,000 \text{ m}$ 程度ということになる（図2）。氷が厚くなると、地殻熱流量を運ぶなくなるため、海水は徐々に温められ、氷が融け、結局は $1,000 \text{ m}$ 程度の厚さに落ち着くことになる。

一部の生命は、こうした内部海において生き延びることができたのであろう。とりわけ、海底の熱水噴出孔付近において、熱水に含まれる水素や硫化水素、メタンなどを酸化する際のエネルギーを利用する化学合成独立栄養細菌などは、地表面の気候状態の影響を全く受けることなく、生き延びることができたかもしれない。

4. スノーボールプラネット

1995年に太陽以外の星の周囲に惑星が発見されて以来、既に数千個にも及ぶ太陽系外惑星の候補天体が発見されている。太陽系のような惑星系は宇宙において普遍的な存在であり、地球のように地表面に水が存在する地球型惑星（以下、水惑星と呼ぶ）は、今後数多く発見されることがほぼ確実である。水惑星は、たとえ全球凍結したとしても、惑星内部からの地殻熱流量が十分大きい（図2）、海洋は完全に凍結せずに内部海が形成される⁴⁾。

そもそも、全球凍結状態は、水惑星が取り得る安定な気候状態の1つである（図3）。たとえばその惑星が、液体の水が存在し得る軌道領域（ハビタブルゾーン）に存在していたとしても、大気の温室効果が不十分であれば全球凍結す

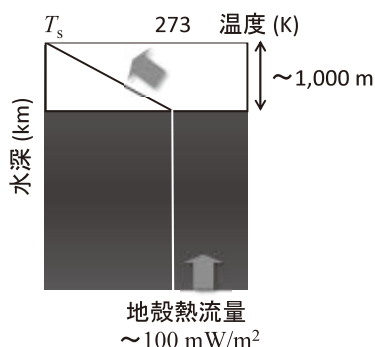


図2 全球凍結時の海洋鉛直構造

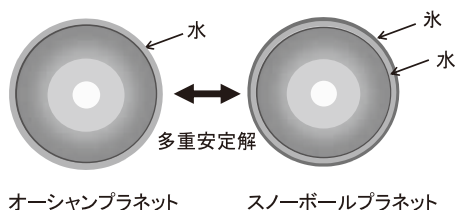


図3 水惑星が取り得る安定な気候状態と水の存在
両者は反射率が異なるため、同じ日射量条件でどちらの気候状態も取り得る（多重平衡解という）。どちらも惑星表層に液体の水が存在する

る。地球が正にそのような経験をしたことは、前述の通りである。ハビタブルゾーンの外側境界は温室効果の限界により必ず全球凍結する条件で決まる。水惑星がもともとハビタブルゾーンの外側領域に形成されれば、必然的に全球凍結してしまう。すなわち、宇宙には全球凍結状態の水惑星が普遍的に存在し得る。こうした惑星を、スノーボールプラネットと呼ぶ⁴⁾。

スノーボールプラネットは、表面が氷で覆われているものの、内部には液体の水が存在している。だとすれば、生命が存在している可能性もゼロではない。一般に、ハビタブルプラネット（生命生存可能惑星）とは地球のように表面に海を持つ惑星（オーシャンプラネット）のことを指すが、もしかするとスノーボールプラネットもハビタブルプラネットの一形態だと考えるべきなのかもしれない（図3）。

現在の太陽系にはスノーボールプラネットは存在しないが、類似の候補天体は存在する。木

星の衛星エウロパ、ガニメデ、カリスト、土星の衛星エンセラダス、タイタン、そして海王星の衛星トリトンなどである（図4）。これらは氷衛星と呼ばれ、それぞれ探査機による観測などによって内部海が存在が示唆されている。

氷衛星は氷と岩石からなり、天体サイズも小さいため、放射性元素の量が少なく地殻熱流量も小さい。したがって、通常であれば、これらの天体に内部海が形成されることはない。ところ

ろが、巨大惑星の近傍を周回しているため、巨大な潮汐力（衛星内部の場所によって惑星からの引力が微妙に異なるために発生する力）によって内部変形が生じ、それによって発生する熱のために氷が融解して内部海が形成されているのだらうと考えられている。

これらの天体は、理由は異なるにせよ、内部海が存在しているという点においてはスノーボールプラネットと同じ状態にあることから、大変興味深い。当然、生命の存在可能性に注目が集まっており、特にエウロパやエンセラダスは、太陽系内においては火星と並んで地球外生命探査の有力な候補天体となっている。

5. 惑星進化とハビタビリティ

地球が、誕生して約46億年経った現在でもなお活動的な惑星であるのは、地球内部での放射性元素の壊変に伴う発熱によるものであった。地球内部は現在も高温であり、マントル対流によって熱が輸送され、地表面ではプレートテクトニクスによって火成活動が定期的に生じており、それによって二酸化炭素をはじめとする様々なガス成分が放出され、物質循環を駆動

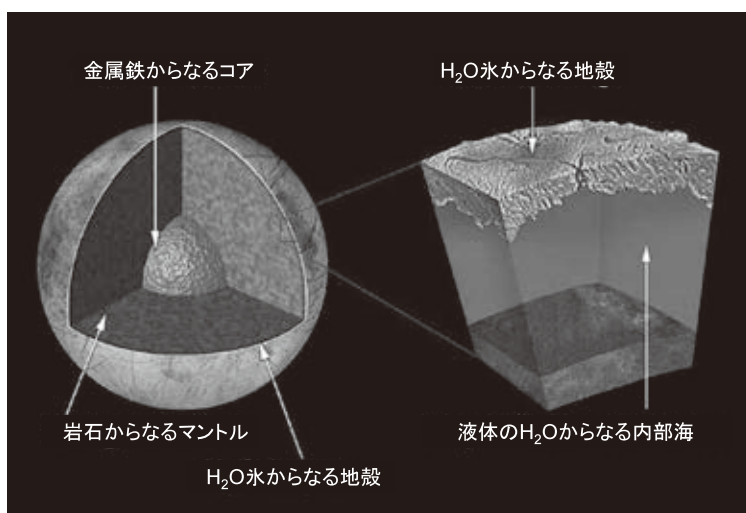


図4 エウロパの内部構造 (NASA/JPL)

している。物質循環によって大気中の二酸化炭素濃度は自律的に調節され、地球は温暖湿潤環境を長期にわたって維持している^{2,3)}。それによって、地球表面には海洋が長期にわたって存在可能となった。これが、地球が生命に満ちた惑星である本質的な理由といえる。

地球は何度か全球凍結イベントを経験したが、そのような条件下においても、地表を覆う氷の下には内部海が存在していた。それもまた、地球内部が高温であることに起因するものであった。

こうした意味において、放射性元素の存在は、生命が生存可能な惑星環境を形成し維持するために本質的な役割を果たしているといえることができるだろう。

参考文献

- 1) Turcotte, D.L. and Schubert, G., *Geodynamics*, John Wiley & Sons (2002)
 - 2) 田近英一, 凍った地球, 新潮社 (2009)
 - 3) 田近英一, 地球環境 46 億年の大変動, 化学同人 (2009)
 - 4) Tajika, E., *Astrophys. J.*, **680**, L53 (2008)
- (東京大学 大学院新領域創成科学研究科)