

50億年後の地球

藤沢健太

山口大学時間学研究所

〒753-8511 山口県山口市吉田 1677-1

e-mail: kenta@yamaguchi-u.ac.jp

要旨

約50億年後、太陽が赤色巨星に進化したときに地球は太陽に飲み込まれるだろうか。もし飲み込まれたとしたら、その後の地球はどうなるだろうか。

1. 地球は太陽に飲み込まれるか

太陽の寿命は約100億年である。太陽が誕生したのが約50億年前だから、50億年後には太陽は赤色巨星となり、その後は白色矮星となって一生を終える。そのとき、地球はどうなっているだろうか。この素朴な疑問は多くの人々の興味を引くらしく、講演会等で宇宙に関する話をする時「太陽の寿命が尽きた時、地球はどうなっているんですか？」と聞かれることがしばしばある。

恥を忍んで白状すると、筆者はこの問いに対する正しい答えを知らない。これまで講演会の質問に対しては、赤色巨星になった太陽に地球は飲み込まれてしまうのですよ、と昔読んだ本の知識に従って答えていたのだが、良く考えてみるとこの答えが正しいかどうか分からなくなってきた。本当に太陽に飲み込まれるのだろうか？それに飲み込まれたとしても、地球はその後どうなるのだろうか？

もしかすると多くの人に誤った説明をしていたのではないかと気になり、改めて書物で調べてみた。すると、本によって書いてあることがまちまちであることに気付いた。

『天文の辞典』（朝倉書店）には、「星の進化の後期」の項目において簡単に「太陽も（中略）赤色超巨星となり、地球をも飲み込んでしまうであろう。」（219 ページ）とある。『最新天文百科』（丸善）には「地球の最期」と題した一節（231 ページ）があり、その記述を要約すると、太陽は地球を飲み込む、地球表面のほとんどは蒸発する、地球を構成していた原子のほとんどは太陽の質量放出に伴って太陽周囲の星雲へ取り込まれる、となる。つまり地球は蒸発して星間物質となる。

一方、シリーズ現代の天文学第10巻『太陽』（日本評論社）では、「太陽の将来」の項において、太陽半径は約200倍に大きくなり、水星と金星は飲み込まれるが、質量放出によって太陽質量が減少することで地球の軌道がおおよそ1.4倍に広がるため、「地球はかろうじて太陽に取り込まれることを免れよう。」（8 ページ）とある。

そのほか、赤色巨星になった太陽に熱せられて蒸発してしまう、熱されるが蒸発することはない、はっきりしない、など書物によって記述は様々である。井田茂『系外惑星』（東京大学出版会）では、太陽と地球の進化に直接触れてはいないが、「巨星の進化」（73 ページ）の項目において、主星の終末期において惑星にとって重要なプロセスとして、(i)中心星の膨張、(ii)質量放出、(iii)光度の増加、の3つを挙げている。これらは地球の運命を決める要素と言えそうである。

いずれにせよ、50億年後、地球が太陽に飲み込まれるかどうか、身近な書物を調べた限りでははっきりしない。

2. 飲み込まれた場合

太陽に飲み込まれなければ、白色矮星化した太陽の周囲を公転するというのが地球の運命である。現在の太陽の半径は約70万キロメートル、地球の軌道半径は約1.5億キロメートルなので、太陽が200倍以上の大きさになれば、地球が飲み込まれる可能性がある。仮に飲み込まれたとして、その後の地球はどうなるのだろうか。

これには次のような可能性が考えられる。(1) 短時間のうちに太陽が白色矮星に進化し、一度は太陽に飲み込まれた地球は、ほぼそのままの形で惑星として再び白色矮星化した太陽の周囲を公転する。(2) 赤色巨星化した太陽の内部で蒸発する。(3) 赤色巨星化した太陽の中心近くに落下し、そこで破壊されて太陽の物質と混ざり合う。蒸発した場合、一部は質量放出によって星間空間へ放出される。(4) 破壊と蒸発は十分に進まず、白色矮星化した太陽上に、何らかの地球の痕跡をとどめる。

3. 太陽中心へ落下するか

仮に地球が太陽に飲み込まれたとして、地球は太陽の中心へ落下するだろうか、あるいは太陽が白色矮星になるのが早いだろうか。これは赤色巨星化した太陽内部で、公転運動する地球が受ける動圧(ラム圧)によって公転エネルギーを失う時間と、太陽が進化する時間を比較することで解決できそうである。動圧が強ければ地球は速やかにエネルギーを失って中心へ落下する。

この計算には、膨張した太陽の密度と、赤色巨星から白色矮星へ進化する時間に関する知識が必要である。赤色巨星となった太陽の密度分布が一樣という(天文学者にあるまじき)単純化をして計算をすると、太陽に飲み込まれた地球が公転エネルギーを失う時間スケールは約1000年となる。太陽進化の時間スケールを100万年と仮定すると、1000年はそれよりもはるかに短く、地球は太陽中心へ落下することになる。

ただしこの時間スケールは太陽の密度に反比例する。赤色巨星化した太陽の表面付近の密度は平均値よりずっと低いだろう。もし平均値より3桁低ければ、地球は生き延びる可能性がある。恒星の内部構造と進化に関する正確な知識を得れば、この問題には答えられそうである。

4. 地球は蒸発するか

太陽に飲み込まれた地球は周囲を高温のガスに取り囲まれ、強力な放射を浴びことになる。高温にさらされた地球は蒸発してしまうだろうか。

まず、地球を岩石のかたまりと考え、適当な熱伝導率、密度、比熱を仮定する。周囲を熱浴で取り囲まれたとして、地球内部の温度が変化する時間スケールを概算すると、100億年程度となる。46億年前に地球が形成してから現在までに冷却が続いており、今でも形成期の熱の一部が残留している、という研究報告(The KamLAND Collaboration 2011)があったので、地球の温度変化の時間スケールが100億年というのはまずまず良い推定のように思える。すなわち、地球が岩石の球なら、地球内部に熱が浸透するには赤色巨星化した太陽の進化時間より十分長い時間を要す。

しかし、宇宙空間で冷却する地球という話とは異なり、太陽の内部は大変な高温である。もし飲み込まれた地球を取り囲む環境が10万度ならば、上記の概算時間よりずっと短い時間で岩石は融解、蒸発するのに十分な高温になる可能性がある。それに地球全体の温度が上昇する以前に、表面の物質は容易に蒸発するだろう。蒸発した物質が速やかに地球表面から離脱すれば、そもそも地球が個体の球と仮定

した熱伝導の計算は前提が誤っていることになる。太陽内部で地球は運動するため、毎秒30キロメートル程度の風が吹き付けることになる。これは亜音速だが音速に近い。この風によって蒸発した表面物質は容易に地球から離脱しそうである。

地球が蒸発するのに必要なエネルギーは、例えば地球の自己重力ポテンシャルと同程度ではないだろうか。これは10の32乗ジュール程度である。もし地球が10万度の放射環境に置かれたら、単位時間に入射するエネルギーは10の27乗ジュール毎秒である。したがってわずか10万秒（約1日）で地球が蒸発するのに必要なエネルギーを地球は受け取ることになる。もちろんこれがすべて地球の加熱・蒸発に利用されるのではなく、大部分は再放射されるから、地球が蒸発するまでの時間は1日よりずっと長いだろう。

結局、地球が蒸発する時間スケールは、1日から100億年の間ということになる。赤色巨星太陽の内部の温度を正確に知ること、高温にさらされた地球の状態変化を正しく理解することが必要であろう。

5. 地球が破壊される機構

前節で、熱による地球の蒸発について考察した。しかし蒸発するより早く、何らかの力学的な機構で地球が破壊されることはないだろうか。潮汐破壊、浮力、ラム圧の順に考えてみた。

まず潮汐破壊である。太陽の質量は中心に集中していると仮定し、そこへ地球が接近した場合に潮汐力で破壊される距離は、およそ地球半径の100倍、すなわち現在の太陽の半径程度である。赤色巨星化した太陽の場合は質量分布が広がっているため、この距離はやや小さくなるだろう。

次に浮力である。まず地球の密度分布が一樣と仮定する。この場合、赤色巨星化した太陽内部の、地球と同じ密度の位置で地球を静かに放置すれば、地球はそこで浮遊する。しかし地球内部は非一樣であり、中心部が高密度である。非一樣な地球を上記の条件で放置すると、高密度核が低密度マントルを突き破って（この時間スケールは十分短い）落下することになり、地球は大きく破壊される。これは赤色巨星化した太陽内部の、地球と同じ程度の密度の位置で生じる現象であり、その位置は現在の太陽半径よりやや小さいだろう。

ラム圧で地球を破壊するのに必要な条件は、ラム圧で生じる加速度が地球の重力加速度を上回る、として推定できそうに思える。地球の速度を現在の公転速度と仮定して計算すると、この臨界値となる周囲物質の密度は1グラム毎立方センチメートル、すなわち現在の太陽の平均密度程度である。やはり現在の太陽半径よりやや内側でこの条件が成立する。また、ラム圧による加速度と地球内部の非一樣性による破壊が考えられる。これについては考察しなかったが、これが力学的破壊に最も有効に作用するかもしれない。

上記の機構のどれがどのように作用するのかわからないが、いずれにせよ現在の太陽半径程度まで地球が落下すると、力学的な破壊が生じるのは間違いなさそうである。

なお、地球が現在の太陽半径まで落下する際に放出される位置エネルギーは10の36乗ジュールに迫る大きさ、つまり蒸発に要すエネルギーの1万倍である。このエネルギーが地球の破壊や蒸発の過程に利用されれば、太陽中心近くに落下する以前に、確実に地球は消滅しそうである。いわば赤色巨星化した太陽の内部で地球は流星となって消滅するわけである。ただし亜音速の落下なので、周囲のガスを圧縮して高温化する効果は強くない。むしろ周囲の太陽ガスのほうが高温と考えられ、冷たい流星になりそうである。

6. まとめ

色々と考えてみたが、恒星の内部構造と進化についてもっと勉強しておくべきだった、と反省するばかりであり、結局のところ50億年後の地球の運命は良くわからない。果たして地球は太陽に飲み込まれるのか、それとも白色矮星化した太陽の周囲に存在し続けるのか、あるいは破壊され蒸発して、質量放出に伴って宇宙空間へ戻るのか、はたまた白色矮星化した太陽の表面に固着するのか。

ただ、地球の場合はともかく、水星と金星は飲み込まれ可能性が高い。太陽系外に目を向ければ、続々と見つかっている系外惑星にも飲み込まれる候補天体が多数ある。ホット・ジュピターが主星に飲み込まれたらどうなるのだろう。惑星が持ち込む物質や角運動量は、主星の進化、特に終末期に影響を及ぼすことはないか。惑星状星雲の形成や、星間物質の化学進化には関係がないだろうか。

もしこの問題の答えをお持ちの方がいたら、ぜひ教えを請いたい。そもそも上記の考えにも大きな誤りや考え違い、計算違いなどが十分あり得る。専門家のご指摘、そして明快なご説明を期待している。

謝辞

本稿に適切なお意見を下さり、また天文月報への投稿を後押ししてくださった仙台市天文台台長、東北大学名誉教授、土佐誠先生に感謝いたします。

追記：本稿を書き終えた後で、恒星に飲み込まれる惑星とその後の恒星の進化について詳細に研究している論文をいくつか見出した（例えば Livio and Soker 1984, Livio & Soker 2002）。非常に興味深い結果がいくつも示されているが、なお未開拓な領域であるとの印象を持った。

参考文献

- 1) 磯部、他（編）、2003、天文の辞典（朝倉書店）、219 ページ
- 2) Michael A. Seeds, Dana E. Backman（有本信雄監訳）、2010、最新天文百科（丸善）、231 ページ
- 3) 桜井、他（編）、2009、太陽 シリーズ現代の天文学第10巻（日本評論社）、8 ページ
- 4) 井田茂、2007、系外惑星（東京大学出版会）、73 ページ
- 5) The KamLAND Collaboration, 2011, Nature Geoscience 4,647
- 6) Livio M., Soker N., 1984, MNRAS, 208, 763
- 7) Livio M., Soker N., 2002, ApJ, 571, L161