

生命の「復興力」

巻頭インタビュー

東京大学大学院総合文化研究科教授

構成◎大拙博善 *composition by Hiroyoshi Otsuki*

磯崎行雄

「大量絶滅」を乗り越えてきた生命進化

46億年におよぶ地球史のなかでも最近の5億4500万年は、生物活動の記録が多く残されているため「顕生代」と呼ばれる。この間、生物種の大半が絶滅に追い込まれた“大量絶滅”が5回起きた。地球環境が激変するなか、生命はあらゆる可能性を試みながら進化を続けてきた。「それほど生物はタフな存在なのです」と語る、磯崎行雄・東京大学大学院総合文化研究科教授に、生命が幾度も大量絶滅を乗り越えてきた歴史を聞く。

私は“地球と生命の歴史”に関心を持って研究を続けているのですが、そこから見えてくる生物の進化史は、時とともに自発的に姿を変えるべく予めプログラムされたものだったとは、とても考えられない姿です。

数十億年という時間のなかで、単純な生物から複雑で大型の生物へと進化してきたのは事実です。しかし、実際の進化の道筋は、進化開始のスイッチを入れたら、後は自動的にプログラム通り進んで、最後に人間が誕生するという、単純で直線的な歴史ではありませんでした。



磯崎行雄(いそぎ・ゆきお)
1955年滋賀県生まれ。1978年大阪市立大学卒業、同大学院理学研究科地質学専攻修士課程終了。山口大学理学部助手、東京工業大学理学部助教授を経て、東京大学大学院総合文化研究科助教授。現在は同大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系教授。専攻分野は地質学、生命史、層位・古生物学。古生代・中生代境界での大量絶滅などを研究テーマとしている。

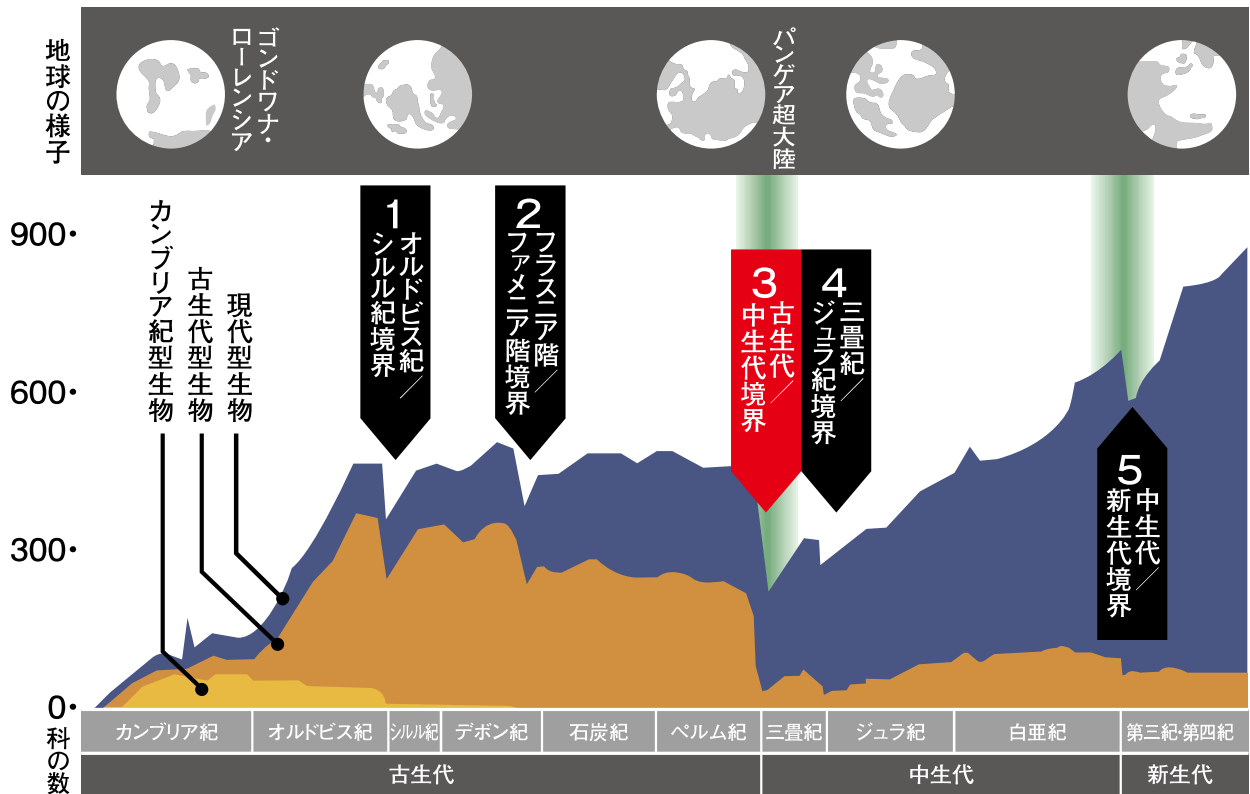
地球という惑星の表層環境が、そこに棲む生物の都合とはまったく関係なしに、たびたび激しく変わりました。ある時は気温が50℃にもなり、またある時には全球が凍りついて「スノーボール地球」と呼ばれる状態が長く続きました。生物としては一方的な受け身にならざるをえない環境変動のなかで、生物種の多くが栄えたり減んだりといった事態を繰り返してきたのです。

そうしたことから、一見すると地球環境に“やられっ放し”に見える生物ですが、実際は意外にしぶとい生命力を持っているのも間違いありません。大規模で長期間におよぶ天変地異が起きても、すべての生物種が絶滅してしまうようなことは決してなく、必ず一部の生物種が生き残ってきたのです。

多くの生物種が生き延びている

たとえば、6500万年前の“恐竜大絶滅”で有名な中生代白亜紀末(K-T境界)の大量絶滅事件。目立つ生物として陸では恐竜、海ではアンモナイトが絶滅しています。よく知られた最大級の陸上動物である恐竜が絶滅したこと、何となく“絶望的な生物絶滅”と

■5回あった顕生代の大量絶滅



現在までの5.5億年間に5回の生物大量絶滅事件が起きている。そのタイミングは超大陸分裂という地球環境の変動と重なることが多い。

思われているのではないのでしょうか。

ところが、生物種レベルでみた絶滅率としては6割程度と見られ、けっこう多くの生物種が耐えて生き延びている。爬虫類に代わって哺乳類の時代へと変化したのは確かですが、実は生物圏全体としては、この絶滅境界の直後も、多様性が順調に増加してきたのです。

また2億5200万年前、古生代と中生代の間（ペルム紀末＝P-T境界）に起きた大量絶滅事件は、K-T境界絶滅より圧倒的に規模が大きかったことがわかっています。当時の海では無脊椎動物の9割以上の種が消えたとされています。

しかしそれでさえ、絶滅によって生物の進化がすべて“振り出し”に戻って、改めてバクテリアから進化をやり直したというわけではありません。大型生物種が絶滅事件のなかを生き残って、新しい年代の種に繋ぐという進化を続けてきている。バクテリアのような微生物にいたっては、絶滅事件とはほとんど無関係に生存し続けていたらしいのです。

——顕生代5億4500万年の間に起きた5回にわたる大量絶滅事件を古いほうから並べると、古生代では

「オルドビス紀末（約4億4400万年前）」と「デボン紀後期（約3億7500万年前）」そして「ペルム紀末（約2億5200万年前）」、中生代では「三畳紀末（約2億年前）」と「白亜紀末」の大量絶滅となる。これらの大量絶滅を招いた原因は何なのか。

これまでに一般の人々の興味を最もひいたのは、前述のように約6500万年前の白亜紀末の大量絶滅です。

過去最大級の陸上生物である恐竜が突然絶滅に追い込まれたという、非日常的な出来事だったこと。加えて、絶滅の原因となったのが典型的な天変地異ともいえる“巨大隕石の衝突”だった点が、専門家のあいだでも大きな話題を呼ぶことになりました。

原因究明のきっかけとなったのは、大量絶滅と同時期の地層に、イリジウムやオスミウムといった地上では希な元素の堆積が発見されたことでした。地球外天体の衝突が推測できるわけで、「巨大隕石の落下で絶滅」との説が浮上。これを裏付けるように、メキシコのユカタン半島の地下に直径200キロメートルのクレーターが見つかり、隕石落下の跡であることも明らかになりました。

その後も、隕石爆発によって生まれる物質が見つかるなどで、大隕石の衝突・爆発によって地球規模の環境擾乱が発生したことが明らかにされました。

直径10キロメートルほどの天体（隕石）が浅い海に猛烈なスピードで落下。衝突・爆発によって大津波や大火災が起きただけでなく、大気中に巻き上げられた粉塵やエアロゾルが日射に大きな影響を与えました。太陽光が長期間さえぎられて、最初は地表の寒冷化が起こり、爆発で散乱した岩石物質などによって酸性雨も発生したことでしょう。

これらの影響で植物は光合成ができなくなり、食料不足から草食動物が消え始め、さらに食物連鎖の上位にいる動物も存在できなくなる……。こうして大量絶滅に至ったと思われます。この絶滅境界を境に中生代が終わり、哺乳類が栄える新生代になりました。

こうして、白亜紀末の大量絶滅に関しては、ほぼ全貌が明らかになったとあってよいでしょう。ところが、他の時期に起きた大量絶滅事件に関しては、原因が推定できる材料がほとんどなく、研究者のあいだでも議論百出の状態が続いているというのが現状です。

絶滅の原因は解明されていない

前述のように、2億5200万年前のP-T境界事件はK-T境界事件よりずっとスケールの大きい大量絶滅で、3億年続いた古生代を終わらせました。その結果、三葉虫、古生代型サンゴ、古生代型アンモナイトなど、多くの生物種が消滅し、入れ替わりに恐竜やアンモナイトに代表される中生代型生物が現れました。しかし、絶滅の規模の大きさにもかかわらず、原因はいまだに解明されていません。K-T境界絶滅と同様に隕石衝突を原因と見る説も提案されましたが、それを立証する証拠は全く見つかっていません。

仮に9割を超える生物種が消えたP-T境界絶滅が隕石衝突だとすると、K-T境界より大規模・広範囲な環境変動があったはずだから、落下した隕石もさらに大型だったと想定されます。もし、それほどの隕石衝突事件が起きたのなら、隕石の衝突・爆発の跡や津波跡といった証拠が地球上に残っているはずなのに、そのような形跡は見つかっていません。

他の時期の大量絶滅でも、地層中に残る化石の種類

■地史を通じてみられる主要な絶滅と環境変動

地質時代 (数字は×100万年前)	主な絶滅生物	主な環境変動	絶滅率(%)
中生代 白亜紀末	竜盤類恐竜 鳥盤竜恐竜 アンモナイト	巨大隕石衝突	60
中生代 三畳紀末	哺乳類型爬虫類 アンモナイト 二枚貝・巻貝類	不明	60
古生代 ペルム紀末	腕足類の貝類 古生代型サンゴ 三葉虫	大規模火山活動 気候寒冷化 超酸素欠乏	90
古生代 デボン紀末後期	造礁性生物 板皮類魚類 三葉虫	海水準低下 気候寒冷化	80
古生代 オルドビス紀末	オウムガイ 三葉虫 コケムシ	海水準低下 気候寒冷化	85

(各種資料より編集部作成)

が劇的に変化することから絶滅があったと判断されるにもかかわらず、原因はこれまで特定されていないのです。

そうしたなかで、最大規模のP-T境界絶滅の原因として近頃最もポピュラーなのが、長期間続いた大規模な火山活動を原因と見る「異常火山活動」説です。

その証拠として挙げられているのが、絶滅とほぼ同時期に噴出したシベリアの広大な玄武岩溶岩です。その大規模噴火で噴出した火山ガスや粒子によって、全地球レベルでの激しい環境破壊が引き起こされたとされます。その結果として、三葉虫、古生代型サンゴ、古生代型アンモナイトなど、多くの生物種が消滅した。そして、恐竜やアンモナイトに代表される中生代へと移ったと考えられるわけです。

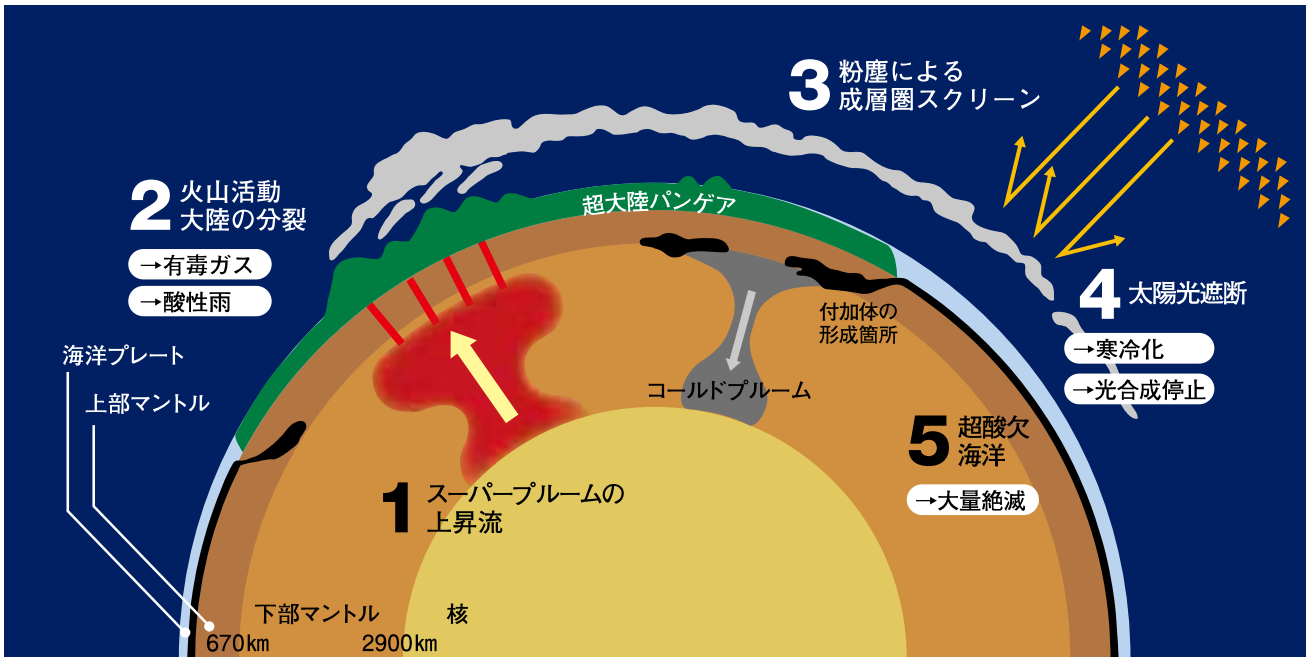
寒冷化は地球内部に原因があった

——このP-T境界絶滅は史上最大で、絶滅率96パーセントという見積りがある。多様な生物が生息していた海域だけでなく、植物や昆虫、脊椎動物などの陸上生物にも影響が及んだ結果だ。これほど大きなスケールの環境変動の原因が、単なる大規模火山活動といった地球表面だけの現象で説明できるのだろうか。もっと根本的な全地球活動に基づくものに違いないと磯崎教授は見ている。

大量絶滅とほぼ同時期に大規模な火山活動があったのは事実です。しかし、それは絶滅の主原因ではなく、

生命の「復興力」

■地球内の要因が絡まって起きた 古生代／中生代境界の大量絶滅



地球内部のマントルにはブルームと呼ぶ大循環があり、その対流変化が結果的に太陽光を遮断し、地表環境の寒冷化によって大量絶滅を起こす。

より根本的な別の原因によって引き起こされた結果の一つだと考えています。地球内部の大規模な変動が主原因となって、表層でのさまざまな環境変動を起こし、その結果、大量絶滅事件に至ったと考えられます。

では、地球内部の原因によって、生物圏が大量絶滅に追い込まれるメカニズムとは、どのようなものでしょうか。

地球型生物の生存・存続にとって最も困難な状況といえば“地表の寒冷化”です。太陽エネルギーからの恩恵が減少すると、生命を保つ生物にとって致命的です。過去の化石記録も、主要な大量絶滅が起きたのは、地表が長期間にわたって著しく寒冷化した時であったことを示しています。

それでは、地球規模で寒冷化を起こすような大規模イベントとは何でしょうか。大規模な火山活動に関連したという観点から考えると、地球内部の物質・熱の移動に根本的な原因があると推測できます。

ここで地球の内部構造を簡単に説明すると、それは卵とそっくりです。すなわち地球表面は軽い岩石でできた薄い地殻(卵の殻)で覆われ、その下にはより重い岩石からなる「マントル」(白身)が上下2層に分かれて、地球半径の半分程度の深さまで存在しています。さらに、その下の地球中心部は金属からなる「核(コア)」(黄

身)で、内核は固体鉄だが外核は液体となっています。地球内部の熱を外宇宙空間に運ぶために、マントルの岩石はゆっくり流動・対流します。これによって、地球表層ではプレートテクトニクスと呼ばれる水平運動が起きています。また外核でも、内部熱を運び出すための対流が起きています。

最近では、マントル内での対流はブルームテクトニクスで説明されています。厚さ3000キロメートルに及ぶマントルの内部で起きる上下方向の物質の流れをブルームと呼びます。とくに巨大なものはスーパーブルームと呼ばれます。スーパーブルームがマントルの底から上昇すると、その上で大規模なマグマ活動が起きます。しかし大規模な火山活動だけでは大きな寒冷化を起こすことはできません。

生物の大量絶滅を呼んだ寒冷化がどのようなメカニズムで起きたのかを考え続けているなかで、「宇宙からの放射線が地球を寒冷化させる」という学説に出会いました。

デンマークの宇宙気象学者スベンスマルクが提唱する「宇宙から地球大気へ進入する銀河宇宙線の量によって、雲ができる量に変化し、地球表層の温暖化・寒冷化は銀河宇宙線の流入量が支配している」という説明です。放射線には大気分子を帯電させる作用が

あるため、電気を帯びた分子が、雲の粒が水蒸気から凝縮する時の核を作ることができます。したがって放射線の流入量が増えれば雲量が増え、厚い雲が日射量を減らすと、地表は寒冷化します。まさに「地表への宇宙線の入射量が増えると地球は寒冷化する」ことになります。

磁場が弱まると陸上生物は危機に陥る

昨今の地球温暖化問題では、二酸化炭素 (CO₂) による温室効果が大きく強調されてきました。実際には、雲の多い少ないが問題になるにもかかわらず、雲ができる仕組みがよくわかっていなかったこともあって、いつも雲の量は一定と仮定した上での議論がなされてきました。しかし、雲の量は一定ではなく、実際に雲量が大きく増えれば寒冷化へ向かうのは間違いないでしょう。

では、地球に大量の銀河宇宙線が流入するのはどのような時でしょうか。実は地球は外核が対流するために磁石の性質を持っており、これが銀河宇宙線を防ぐ磁場シールドになっています。そのため地表付近まで届く宇宙線は通常極めて弱く、私たちは無事地表で暮らしているわけです。同様に紫外線から私たちを守っているオゾン層の話聞いたことがあるでしょう。もし銀河宇宙線や紫外線の地表への流入が強いと私たちの体はがんだらけになってしまいます。

このように何らかの理由で地球磁場が弱まると、陸上生物は大変危険な状態に陥ります。それでは、地球磁場が弱くなる場合では、地球はどのような状態にあるのでしょうか。地球中心部の核は主に金属鉄でできています。核が持つ熱エネルギーをマントルに放出するため、外核では液体の鉄が対流して、地球磁場を作っています。現在の地球磁場は北極にN極、南極にS極を持っています。ところが地球史のなかでは、この磁場の向きが大きく変動し、N極とS極が逆転してしまう反転現象がたびたび起きました。逆転しないまでも、両極の位置が移動してしまうという現象も珍しくありません。

こうした地球磁場の変動は一定ペースで起きるわけではなく、頻繁に反転する時期もあれば、数千万年間も不変だった時期もあります。逆転が長時間起きな

かった期間は磁場が安定した状態に、一方、逆転が繰り返し起きた時期には磁場が不安定な状態にあったと考えられます。地球磁場が不安定になれば地場強度が下がり(シールドとしての能力が落ちて)、銀河宇宙線の流入が増え、雲ができやすくなったと考えられます。したがって「地球史のなかで地球磁場の逆転が頻繁に起きた時期には、寒冷化が起きた可能性が高い」という仮説が出てきます。

そこで地球磁場の安定期・不安定期のパターンと、生物の大量絶滅が起きた時期を見比べてみると、安定期が終わり、不安定期に入った時に絶滅事件が起きたように見える例があることがわかりました。その一つが先に述べたP-T境界事件でした。

——地球磁場が反転するという全地球レベルの出来事が生物の大量絶滅を招く、という可能性が提出された。しかし「磁場の反転はなぜ起きるか」という肝心の点に関する“全地球的現象”の説明が必要だ。さらに、最もポピュラーな絶滅説である“火山大噴火説”を内包しつつ、これを超える学説とすることができるのだろうか。

ここで、地球表層で起きている「プレートテクトニクス」と先にお話ししたマントル内で起きている「ブルームテクトニクス」を思い出してください。また核で起きている地磁気の発生メカニズムも重要です。

地磁気の変動のみならず大規模な火山噴火を起こし、かつ大量絶滅に至る表層環境変動が起きるまでのシナリオを、順を追って説明すると以下ようになります。

ステップ1 プレートテクトニクスによって大陸の下に沈み込んだプレートの残骸は、マントル内のあるレベルまでゆくと、周囲との密度の関係でそれ以上沈み込めなくなり、そこでしばらく留まって大きな塊を作る。この塊が巨大になると重くなって、一気にマントルの底にまで落ち込む。

ステップ2 上から落ちてくるプレート残骸の塊は比較的低温なので、マントルの底に届くと、核の表面を急激に冷やすため、核内の金属の対流パターンが乱され、地磁気の状態が大きく変化する。

ステップ3 地球磁場の状態が不安定になり、地球磁場の逆転が起きやすくなる。

ステップ4 不安定化した地球磁場は強度を減じて、

生命の「復興力」

“宇宙線シールド”としての機能が低下する。

ステップ5 宇宙線の流入が増え、その結果雲量が増えると地表は寒冷化する。

P-T境界絶滅が起きた2億5200万年前といえば、プレートテクトニクスに従って世界中の大陸が一カ所に

集まり、「パンゲア」という超大陸が存在していた時期に重なります。すべての大陸が集まって超大陸を作った時に、その下には大量の沈み込んだプレートの残骸が溜まったはずですが、それが一気にマンツルの底まで落下すると、入れ替わりに大きなブルーム、そうスーパーホットブルームが上昇しなければなりません。さもないと地球の形が変わってしまうからです。そこで絶滅当時に起きた異常火山活動も説明が可能となります。

ステップ6 高温のスーパーホットブルームが上昇すると、その上には大規模なマグマが発生し、地上では異常に規模の大きな火山活動が起きた。

このように、P-T境界事件は単に地殻の表層だけに起きた環境変動ではなく、地球中心部にある核での変動や宇宙線の影響の下で起きた全地球的ともいえる変動の一部であったと考えられます。

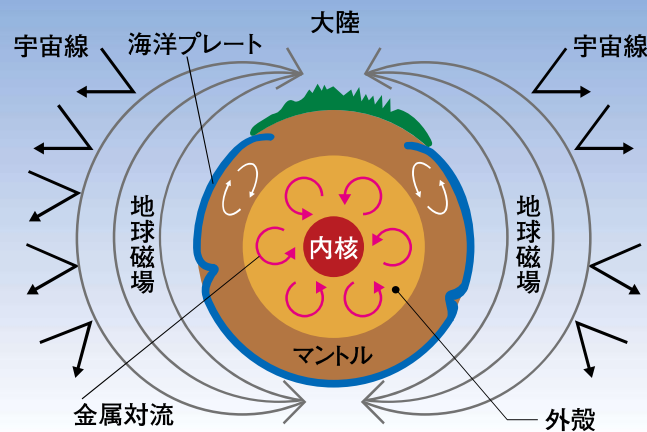
これまでの学問体系では、地球についての現象は地球科学で扱い、生命現象は生命科学で扱うといったように、別々の研究分野で別々の研究者が仕事をしていました。しかし地球ダイナミクスの理解が進むにしたがって、生命の

誕生・進化は固体地球の進化史という観点抜きでは語れないことがわかってきました。地球が変化を続けるなかで、生物はしぶとく生きてきたのです。今後も地球が存在する限り、生命進化が止まることはないでしょう。



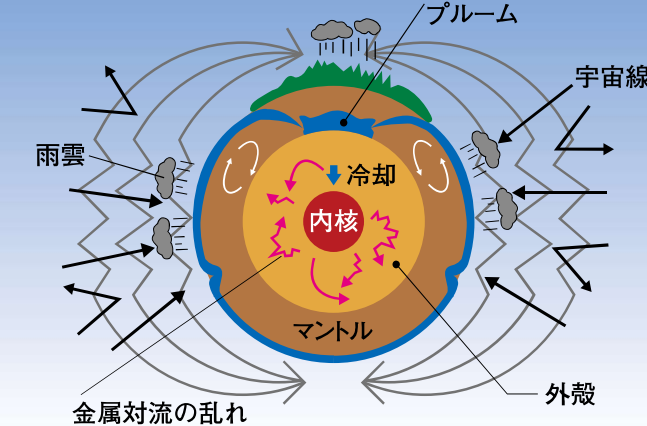
■大量絶滅に至るシナリオ

■平静時



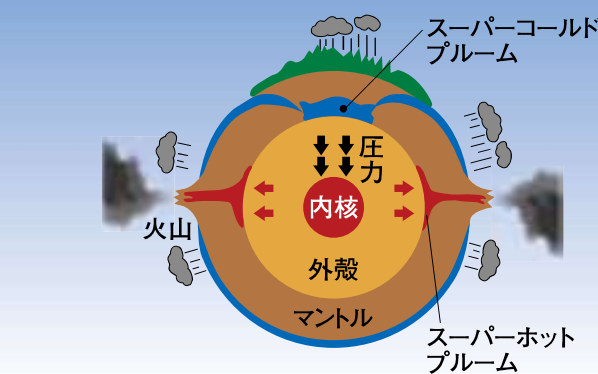
平静時は、外殻の金属対流が安定しているため、核の起電力でつくられる地球磁場も安定し、地上に届く宇宙線の量も抑えられている。

■ステップ1～5



プレートの残骸が大きな塊（スーパーコールドブルーム）となってマンツルの底（外殻の上部）まで落ちると、内核が冷やされ、金属対流が不安定になる。そうすると地球磁場に乱れが生じ、地球大気に入る宇宙線量が増加、雲量も増加する。地表は寒冷化する。

■ステップ6



スーパーコールドブルームの下降流に押されるかたちで上昇流のスーパーホットブルームが発生。地表で火山活動を起こす。