

愛知の大地のなりたち 3 先カンブリア時代①

地球ができてからの 46 億年の歴史の中で、先カンブリア時代と呼ばれる時代はそのほとんど (88.3%) を占めます。その時代の様子を伝えるものはほとんどなく不明な部分が多いですが、現在の地球を構成する要因となった様々なできごと (海洋の形成, 大気中の CO₂ の減少や酸素の発生など) があったことが推測されます。現在, 考えられている先カンブリア時代の様子を紹介します。

(1) 地球の組成

地球は層構造をつくっていることはご存じだと思います。地表から地殻, マントル, 外核 (外部コア), 内核 (内部コア) に分かれ, 液体なのは外核だけで, 上部マントルは

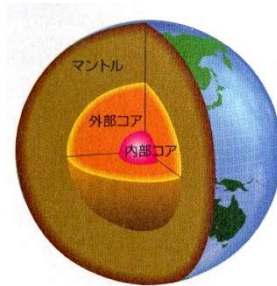


図1 地球の内部構造 (谷合, 2014)

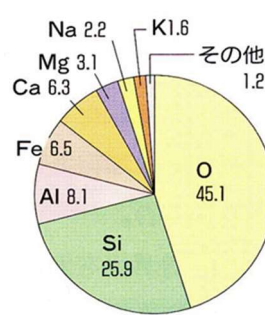


図2 地殻の化学組成

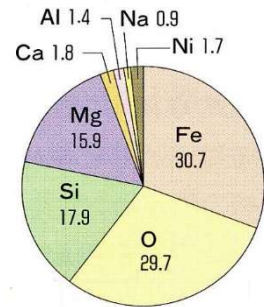


図3 地球全体の化学組成

図2・図3とも重量%(浜島書店編集部, 2023)

他の部分は固体 (岩石)

です。最も大きな体積を占めるのはマントルです。地殻の化学組成は, 重量%の 7 割以上を酸素とケイ素 (Si) が占めており, 主に岩石をつくっています (図1)。酸素は大きな元素ですので, 体積%では地殻の 94%は酸素だといわれています。マントルは Si と Mg が多くを占めており, 核はほとんどが Fe で Ni や Coなどを少し含んでいます。外核は 10%ほど軽元素 (硫黄, 酸素, ケイ素が混ざり合っている?) が含まれていることが分かっています。地球全体の組成は, 太陽大気や隕石などから推定されますが, 困難なことが多く, 研究者によって数値はばらつきがあります (図3)。

(2) 地球の形成

見出しに先カンブリア時代という言葉を使いましたが, 近年は細分して古い方から, 冥王代 (46 億年前~40 億年前まで), 太古代 (従前は始生代ともいわれました: 40 億年前~25 億年前まで), 原生代 (25 億年前~5.4 億年前まで) という名称がよく使われます。冥王代の地球は現在よりも小さく, 小天体 (小惑星・彗星) がまだ継続的に降り注いでいました。この多数の小天体の衝突は後期重爆撃と呼ばれます。後期重爆撃期は 39 億年前ごろには終了したようです。地球最古の鉱物は西オーストラリアの碎屑性ジルコン*で, 44 億年前のものとされ, 含まれる微量元素の割合と酸素同位体の比率が現在の大陸地殻の持つ特徴と似ていることなどから, すでに大陸の存在が推測されます。また, カナダのハドソン湾東岸から 43 億年前, カナダのアスタ片麻岩から 39.6 億年前の年代が報告されています。地球の場所によっては, 誕生から 1000 万年もすると地殻が形成されはじめ, 1 億年もすると冷えはじめ, 陸地が形成され始めたらしいと考えられています。

*ジルコン: 花崗岩のような SiO₂ に富む火成岩に含まれ, 硬く風化に対して強いいため河口付近の堆積物に濃集しやすい性質があります。ジルコンに含まれるウランを使って年代測定が行われます (U-Pb 年代測定法)。

前号で紹介したように小天体の衝突（惑星集積）によって解放される熱と、脱ガスした揮発性物質からなる大気の保温効果によって地表付近はマグマオーシャンに覆われました。

そこでは密度の差に応じた重力による分離が起こり、もっとも密度が高い金属鉄が地球の中心部に沈み、ケイ酸塩・酸化物からなるマントルと金属鉄からなる核が分化して、おおまかな成層構造ができました（核形成といいます）。この時、鉄とともに核に濃集した元素を親鉄元素、マントルに濃集した元素を親石元素と呼びます。親鉄元素とは、鉄と結びつきやすい元素で、Ni, Co, Mn, C, Au, Pt, W などです。Au（金）などが地表付近で多く見られないのはこのためです。

金属鉄の層はマグマオーシャンの底に蓄積していき、中心部には初期に集積した未分化な物質がつかまっています。この未分化な核（芯）は内部が高温になって融解して金属鉄とケイ酸塩に分離するか、ある時点である方向に浮き上がるようにして破壊して金属鉄の層と入れ替わったと考えられています。

誕生直後の地球はまだ内部が高温だったため、地球表面で冷えたプレートは沈む途中で温められて深く沈み込むことができず、上部マントルと下部マントルは別々に対流していました（2層対流）。沈み込み帯では弧状列島が造られ、それらがプレートの動きで衝突し、小さな大陸ができていきます。地球が冷えてマントルが硬くなると、沈み込んだプレートは、上部・下部マントルの境界に溜まり、27億年後には、それがマントルの底まで落下し（コールドプルーム）、その反動でマントル下部から高温の物質が上昇し、マントル全体での大きな対流が始まったと考えられています（マントルオーバーターンといいます：図4）。今まで対流のなかった液体鉄の核の表面が冷やされることで、

温度差による対流がおこります。外核内部で液体金属が大きく対流し始めたため、地磁気が増大したとされます。地球が磁場に囲まれると、地表に届く放射線量は減少し、生物は海の浅瀬にまで進出できるようになりました。また、マントル対流の規模が大きくなったことで、小大陸が大きく移動して衝突し、やがて超大陸が形成されたと考えられています。プレートテクトニクスがいつ始まったのかについては、カナダの造山帯が27億年前のものであることから、少なくとも27億年前からプレート・テクトニクスは作用していることがわかっています。

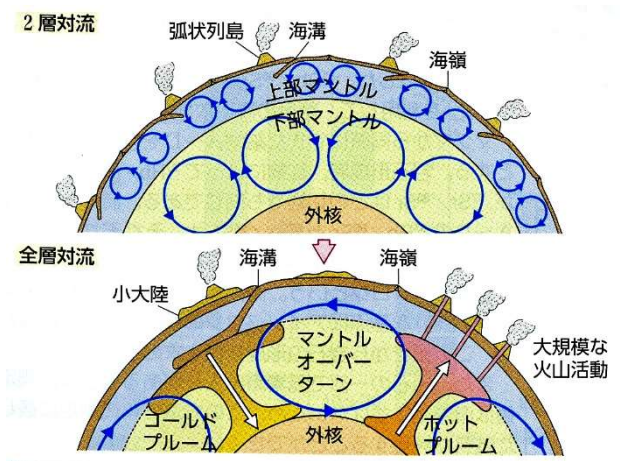


図4 マントルオーバーターン(浜島書店編集部, 2023)

2016年には、少なくとも35億年以前に始まったという論文も出されています。できた地殻（大陸の一部）は丈夫で比較的、密度の小さい（軽い）岩石でできており、ほとんどの大陸の形成は大昔に起こったあと、そのままマントルに浮いたように安定的に存在してきたと考えられています。もちろん何度も分裂・合併などは繰り返されました。海洋底はマントル対流で生まれ変わってしまうため、およそ2億年程度より若いものばかりですが、大陸地殻には太古代の頃に存在していた陸地が見られます。ちなみに、日本では先カンブリア時代を示すものとして、岐阜県の上麻生礫岩中の片麻岩礫（約20億年前、1970年発見）、と島根県津和野町の花崗片麻岩（25億年前、2019年報告）が知られています。

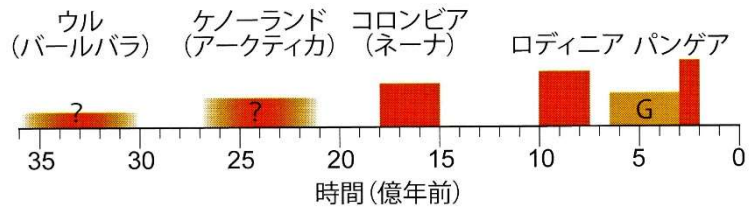
(3) 大気と海洋の形成と変化

原始地球の最初の大気（一次大気）は H_2 , He を主成分とする星雲ガスですが、軽いガスのため大部分は失われました。その後、微惑星（隕石）の衝突などによってもたらされた揮発性物質などが二次大気をつくります。大気ははじめは主に $H_2 \cdot CH_4 \cdot CO \cdot N_2 \cdot H_2O$ からなっていたと考えられています（従来は CO_2 と H_2O が主体だったと考えられていました）。 H_2 は宇宙空間に逃げ、 H_2O を含む光化学反応 ($CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$, $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$) を通じて CO_2 が生じます。その後、数億年かけて地表が冷え、水蒸気が雨となって地表に降り注いで海ができると、大気は CO_2 と N_2 を主成分とするものに変化していきます。海洋ができると、 CO_2 は海水に融け込んで石灰岩などに变化ししだいに減少していきます。光合成が始まると二酸化炭素はさらに減少し、一方、酸素が増加し始めます。窒素は反応せずに残り、現在では最も多い成分となっています。大気が地表で約 100 気圧以上に達するほど厚くなると保温効果が強まり、マグマオーシャンが形成されたといわれます。マグマオーシャンへ気体成分が融け込むようになると、原始大気はある一定の量（厚さ）に落ちついてきます。このことが原始大気中の水蒸気量（のちの原始海洋の質量）を決めた可能性があるといわれます。

地球が冷えてくると、脱ガスによってもたらされた大量の水蒸気は雨となって地表に降り注ぎます。その時、脱ガスによってもたらされた塩素ガスや SO_2 を溶かし込んで酸性の原始海洋ができました。数千 mm/年の降水が約 1000 年ほど続いて原始海洋はつくられたといわれます。約 38 億年前には海洋が存在し（43~40 億年前頃に誕生？）海洋地殻もできていたと考えられています。酸性の強い海水は陸上の岩石中の Na や Ca などを溶かし出し、海へ運びます。そして、海水に Na などが混じることで中和され $NaCl$ などを含む海水に変わっていきました。

(4) 先カンブリア時代の環境の変化

砕屑岩（砂岩や泥岩など）に含まれるジルコンの U-Pb 年代測定によると、大陸の成長は、2800-2500Ma, 1800-1500Ma, 100-500Ma に急激に進んだことがわかっています（図 5）。現在、最古の大陸として 30 億年前ころに存在したウル大陸が考え



超大陸が存在していた時代. G はゴンドワナ大陸.

図 5 超大陸の歴史（鳥海光弘ほか（編），2018）

られています。今のアフリカ大陸、オーストラリア、インド、南極大陸（一部分？）もそれに含まれていました。その後、大陸は成長、分裂を、合併を繰り返して現在の姿になっていきます。ゴンドワナ大陸やパンゲア大陸は有名ですね。ゴンドワナ大陸は、主に南半球に位置しており、現在のアフリカ大陸、南アメリカ大陸、オーストラリア大陸、南極大陸、インドが含まれていました（図 6）。パンゲア大陸は、2 億 5000 万年前頃から分裂がはじまり、現在の 6 大陸に分かれました。この分裂は、古生代末の最大規模の生物の大量絶滅に関わっているのではと考えられています。

大気中の二酸化炭素の増減と酸素の増加も大きな出来事です。二酸化炭素濃度は多少の増減を繰り返しながら全体としては減少し続けます。二酸化炭素は海水に融け込んで石灰岩などに变化した

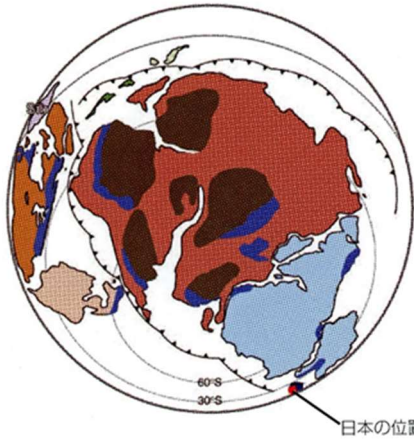


図6 ギンドワナ大陸

(岐阜県博特別展パンフ, 2017

原図は Isozaki, et al., 2010)

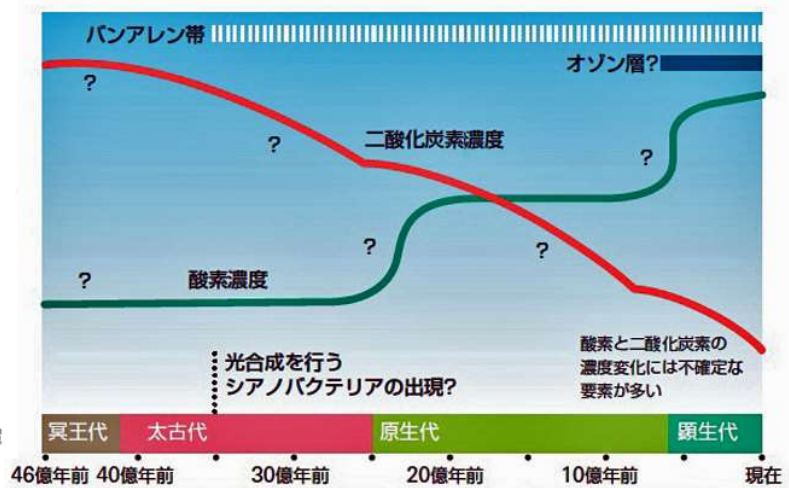


図7 地球大気の変化 (出典不詳)

り、光合成が始まったことなどが減少の原因です。原世代前期と後期には二酸化炭素が大きく減少し、全球凍結（スノーボールアース*）が起こったと推測されています。全球凍結は約 22 億年前、約 7 億年前、約 6.5 億年前の 3 回が知られています。

大気中の酸素濃度は多少の増減を繰り返しながら増加していきます。特に全球凍結後の約 22 億年前と約 6 億年の 2 回は急増し（大酸化イベント）、全球凍結との関係が指摘されています。その原因として、プレートテクトニクスとの働きで、大陸地殻を構成する岩石が酸素と結合する能力の弱い SiO_2 に富む岩石が変わったことや、軽い炭素が大量に大気・海洋に供給されたこと（メタンハイドレートの崩壊）、それにあわせて急激な大陸の風化が進んだ（地表気温の上昇）ことなどいろいろな考えがあります。約 22 億年前に酸素濃度が現在の 100 分の 1 に達すると、真核生物の誕生が促され、約 6 億年前、現在に近い濃度になって多細胞生物の誕生を促したといわれます。また、酸素濃度の急増はオゾン層の形成をもたらす、生物の陸上進出へつながっていきます。

*スノーボールアース：地球表面全体が凍結するほどの激しい氷河時代が存在したという考え。大量の二酸化炭素が地殻に固定され、大気中の二酸化炭素量が低下したことや、発達した氷床が太陽光を反射したため一層の寒冷化を招いたなどが要因として考えられています。

引用・参考文献

在田一則ほか, 2015, 第 2 版 地球惑星科学入門.北海道大学出版会, 447p.

浜島書店編集部, 2023, 二訂版ニューステージ地学図表. 浜島書店, 233p.

Isozaki, Y. et al., 2010, New insight into a subduction-related orogen: A reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, 82, 82-105.

川上伸一・東條文治, 2009, 地球史がよくわかる本. 秀和システム, 382 p.

谷合 稔, 2014, 地球・生命-138 億年の進化. SB クリエイティブ, 270 p.

鳥海光弘ほか (編), 2018, 図説地球科学の事典. 朝倉書店, 248 p.