

論文の内容の要旨

Growth of continents during the Archean and Proterozoic eons: isotopic and geochemical analyses of 3.4–2.2 billion year old sandstones

from southern Africa, North America, and western Australia

(太古代・原生代の大陸成長：アフリカ南部、北アメリカ、および
オーストラリア西部の 34～22 億年前砂岩の同位体および地球化学分析)

総合文化研究科広域科学専攻 沢田 輝
指導教員 磯崎行雄

花崗岩質大陸地殻の成長史は、固体地球の進化の変遷の記録であり、その詳細を解明することは地球史研究の最重要課題の 1 つである。大陸地殻を構成する花崗岩類はおもにプレート沈み込み帯の火成活動で形成される。一方で、プレート沈み込み帯では、一度できた大陸地殻岩石が再溶融、変成作用、あるいは堆積作用を通して二次的に若い岩石につくり変えられること(地殻の再利用, crustal reworking)や、構造侵食や島弧沈み込みを通じて大陸地殻岩石が再度マントルへ沈み込むこと(地殻の再循環, crustal recycling)が起こる。このような過程の程度の見積もりは容易ではないため、地球史を通した大陸地殻の増加過程について、これまで多様な「大陸地殻成長曲線」が提案されてきた。

第 1 章では、これまでの大陸地殻の成長史の研究をレビューし、その問題点を指摘する。これまで多くの研究が岩石や鉱物の分析によって得られる地球化学的指標を用いて大陸成長史の解明を試みてきたが、それらの大半は大陸地殻をマントルから分離した仮想的な 1 つの集塊とみなし、それらの構成物質の組成や同位体比の変化から成長を議論してきた。一方で、大陸の形態・サイズといった地質学的実体の時間変化はあまり議論されていない。例えば、太古代や原生代前期の大陸サイズは現在よりも小さかったと漫然と想像されてきたが、その具体的なサイズはほとんどわかっていない。そこで本研究は、特に理解の進んでいない地球史前半にあたる 20 億年前(2 Ga)以前、すなわち太古代から原生代前期の大陸塊の大きさの変遷解明を目標とする。

第 2 章では、最近 20 年間に急速に報告数の増えた碎屑性ジルコンのウラン-鉛年代のコンパイルに基づき、過去の時点での大陸年代構成を考察し、大陸成長解明への意味を議論する。ジルコンは大陸地殻を構成する岩石に広く含まれる鉱物で、高精度のウラン-鉛年代を迅速に測定できる。世界各地から報告された大量のジルコン年代をコンパイルする上で、用いるデータ数が多いほど局所的なデータの偏りが減り、より一般的な傾向が判明すると漫然と考えられてきた。しかし、各々の碎屑岩の堆積年代を区別せずにデータを単純に合算してしまうと、実際には年代ごとの大陸地殻の増減がすべて累積されてしまうという重大な問題がある。そこで、本研究では堆積年代ごとに分けて、同じ年代に堆積した砂岩の碎屑性ジルコン年代をコンパイルし、それらの経年変化を見ることで、現在から約 3 Ga までの大陸年代構成および大陸サイズの変遷を推定した。その結果、約 3~2 Ga の単一大陸が現在のものよりも小さかったこと、激しい地殻の再循環によって大陸成長量は限られていたが、2~1 Ga の間に急速に成長したこと、そして 1 Ga から現在にかけては逆に大陸の総量が徐々に減ったことが示唆された。

第 3 章では 3.0 Ga 以前の大陸消長を探るため、カナダ Rae 地塊上に堆積した砂岩中の碎屑性ジルコンのウラン-鉛年代とハフニウム同位体比を測定した結果を記述し、考察する。ハフニウム同位体比は岩石溶融に伴う分化や混合により変化し、その値は液相濃集元素に富むほど低くなり、逆に枯渇していると高くなる。この性質を利用して、地殻物質がマントルから分離した時期や地殻内で被った再溶融の程度を推定できる。ジルコンは数 %程度のハフニウムを含有し、ウラン-鉛年代と組み合わせることで高精度の Hf 同位体比分析が可能な鉱物である。3.0-2.5 Ga の地殻形成は 3.3-3.0 Ga の地殻を主に再溶融し、より古い 4.0-3.5 Ga の地殻は相対的に保存された事を示す。3.3 Ga の大陸において、現在の大陸同様、縁辺に若い地殻があるという累帯構造の存在が推定される。すなわち、4.0-3.5 Ga の古い地殻を核に 3.3 Ga 頃に萌芽的大陸が出現し始めたことを示唆する。

第 4, 5 章では、年代測定の先行研究例の少ないアフリカ南部ジンバブエ地塊の堆積岩体の年代決定に関する結果をまとめ、考察する。まず第 4 章では、これまでジンバブエ地塊において最古の約 3.4 Ga の緑色岩体であると考えられてきた Shurugwi 緑色岩体の形成年代決定の結果について記述し、その意義を考察する。先行研究では、Shurugwi 緑色岩体に含まれる礫岩中の碎屑性ジルコンの年代が 34~37 億年前であること、同緑色岩体とその基盤の両方に貫入している花崗岩の全岩鉛-鉛年代が約 33.5 億年前であることから、緑色岩体の年代を約 34 億年前であるとしていた。しかし、ジルコン年代測定にあたってカソードルミネッセンスを観察していないことや、変質の進んでいる太古代岩石の全岩鉛-鉛年代は不確実性が大きいなどの問題点がある。本研究では、Shurugwi 緑色岩体に含まれる砂質変成岩、同緑色岩体の基盤をなす花崗岩質片麻岩、および貫入花崗岩のそれぞれから分離したジルコンに対して、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析器(LA-ICPMS)を用いてウラン-鉛年代の測定をした。その結果、基盤の片麻岩は 3.01 Ga、貫入花崗岩の年代は 2.91 Ga であることがわかった。一方で、砂質変成岩中の碎屑性ジルコンは 3.61 Ga のもののみが含まれていることがわかった。加えて、Shurugwi 緑色岩体に含まれるコマチアイト起源の超苦鉄質岩の全岩レニウム-オスミウム年代を ICPMS により測定した。全岩レニウム-オスミウム年代はジルコンのウラン鉛年代よりは不確実性のあるものの、約 3.0 Ga を示した。これらの情報を統合すると、Shurugwi 緑色岩体の形成年代は 3.0 Ga であると結論付けられる。さらに本研究と Zimbabwe 地塊の 3.3 Ga, 2.9, 2.7 Ga の砂岩に対する先行研究をあわせて、堆積年代と碎屑性ジルコン年代分布を比較した。その結果、3.3 と 2.7 Ga では堆積年代とジルコンの最若年代の差が数千万年程度と比較的小さいのに対して、本研究による 3.0 Ga 堆積の SGB と 2.9 Ga の砂岩では堆積年代とジルコンの最若年代の差が

3億年以上開いていることがわかった。この事は、Zimbabwe 地塊は 3.3 Ga と 2.7 Ga は比較的若い大陸縁辺で形成された碎屑物の供給を受けるような場所に位置していた一方、3.0-2.9 Ga の間は大陸塊内部に位置しておりそのような若い碎屑物の供給が遮断されていたことを意味する。したがって、Zimbabwe 地塊の所属していた大陸塊は 3.3-3.0 Ga の間に陸塊の衝突によって成長し、2.9-2.7 Ga の間にリフト活動によって分裂し、Zimbabwe 地塊となる部分が縁辺へ接するように変化したことが想定される。

第 5 章では、ジンバブエ地塊北西の原生代前期 Magondi 累層群の下部から中部の砂岩からジルコンを分離し、LA-ICPMS によるウラン-鉛年代測定の結果を記述し、その意義を考察する。Magondi 累層群は、世界各地の原生代前期の炭酸塩岩中に見られる地球史上最大の無機炭素同位体比異常である Lomagundi-Jatuli 事件の模式地であるため注目されているが、これまでにジルコン年代測定による堆積年代の制約はなされていなかった。本研究の分析によって、Magondi 累層群下部の砂岩の堆積年代が 2.214 ± 0.022 Ga であることがわかった。この結果を Magondi 累層群の層序と比較すると、Lomagundi-Jatuli 事件は 2.214 ± 0.022 Ga には開始したことが示唆される。この開始時期の推定は、先行研究によって明らかにされている北アメリカの Superior 地塊と北ヨーロッパでの Lomagundi-Jatuli 事件開始時期とよく一致していることから、この時代の無機炭素同位体比異常は世界的にほぼ同時期に開始した可能性が高い。

第 6 章では、太古代-原生代の大陸地殻成長と碎屑岩の後背地面積との関係に注目し、砂岩および砂質変成岩の全岩化学組成を測定することで、太古代-原生代の大陸塊サイズの変遷の解明を目指した。砂岩を構成する碎屑粒子は、堆積場の後背地の面積と地形に依存して鉱物種の淘汰が進行する。狭く急峻な後背地を持つ堆積場の砂粒子は淘汰度が低く、後背地の岩石構成とほぼ類似した組成を持つ。これに対して、広く平たい地形を持つ後背地で碎屑物の淘汰が進むと長石や有色鉱物などが風化・変質により除去され、石英やジルコンなどの摩滅に強い鉱物が砂岩に濃集する。

本研究では砂岩における碎屑物分別の指標として、始原的マントルで規格化した砂岩中の微量元素パターンを用いて計算したジルコニウム異常($=[\text{Zr}]/([\text{Nd}] * [\text{Sm}])^{0.5}$)を提案する。花崗岩類を始めとする火成岩のジルコニウム正異常の値は 0.7~2 程度である。碎屑物の淘汰によって、ネオジムやサマリウムを多量に含む褐簾石やチタン石などの鉱物とジルコニウムを主成分とするジルコンが分別することによって、ジルコニウム異常の値は変化する。本研究は、世界各地の 3.4-2.2 Ga の堆積岩体から採集した砂岩 59 試料と、原生代後期から顕生代の 30 試料について、主要および微量元素の全岩濃度を二重収束型 ICPMS により測定した。加えて、砂岩の全岩微量元素組成を報告している先行研究 22 例をコンパイルすることで、地球史を通じた砂岩中のジルコニウム異常の値の経年変化をまとめた。堆積年代ごとにジルコニウム正異常の値を比較すると、太古代中期 3.4-3.0 Ga の砂岩では 0.1 以上 10 以下、そして 2.5-2.2 Ga のものでは 0.2 以上 17 以下とその値に大きな多様性がある。極めて高いジルコニウム異常の値は、特に受動的大陸縁辺で形成されたと考えられる砂岩で顕著であった。一方、3.0-2.5 Ga の砂岩のジルコニウム異常の値は 0.6 以上 3 未満であり、形成場に関わらず火成岩の値とほとんど変わらない。

第 7 章では、上述の成果をまとめた総合的議論を行う。3.4 Ga までには既にある程度の大きさの大陸が出現していたが、それらが 3.0-2.5 Ga の間に矮小化し、さらに 2.5-2.2 Ga の間に大陸サイズは再び増大したことを記録している。おそらく大陸サイズの矮小化はリフト活動による大陸分裂を、またその後の大陸サイズ増加は、一旦分裂した複数の大陸塊が再度衝突・合体したことを、各々示唆する。

第 7 章では、以上の本研究を総括して大陸塊の大きさの変遷を以下のようにまとめる: 1) Stage 1 (4.5-4.2 Ga): マグマオーシャン固化による始原地殻形成とその後の隕石爆撃による始原地殻破壊と海洋の形

成, 2) Stage 2 (4.2-3.2 Ga): プレート沈み込み開始に伴う海洋性島弧様の大陸地殻形成と島弧合体衝突による萌芽的大陸形成, 3) Stage 3 (3.2-2.3 Ga): 萌芽的大陸に対する活発なリフト活動と新規地殻形成および古い地殻の再循環, 4) Stage 4 (2.3-1.0 Ga): 巨大で安定した数千 km サイズの大陸塊出現, およびその縁辺への島弧付加による大陸体積の純増, and 5) Stage 5 (1.0-0 Ga): 現代型プレートテクトニクスとそれに伴う大陸地殻の再循環、大陸体積の純減。本研究に寄って、地球表層の大陸地殻消長は惑星内部の熱史の表現である個々の大陸塊サイズに依存して変化してきたことが明らかになった。