

ジルコン年代学から読み解く原日本列島 5 億年の形成史

理学研究科 地球惑星システム学専攻 准教授

早坂 康隆

はじめに

平成 28 年度(第 13 回)広島大学技術センター研修会(2017/03/15)において表記タイトルでの講演をさせていただきました。日頃より大変お世話になっております技術センターの方々に私の研究内容を紹介させていただけるということで喜んでお引き受けしました次第です。ここでは、その内容を簡単にまとめさせていただきます。

さて、私たちの仲間内では「地質屋は 見てきたような 嘘を言い」という川柳が自虐的戒めとして代々言い伝えられてきました。科学哲学上の学説によると過去形で語られる言説には反証可能性がないとされていて、そのことをもじったものとも受け取れます。歴史科学である地質学は、固体地球や惑星の表層部付近におこった一連の出来事を過去から現在に至る時系列で整理し、その中に潜む法則性のようなものを明らかにしようとしているのですが、この川柳は、地質学が科学の分野にあって特別の困難を抱えていることを象徴しています。過去を明らかにする上で最も大切なことは現在に残されている証拠を調べ尽くすということでしょう。それはまるで犯罪捜査にも似て、現在に残された証拠(遺留品)について科学的な検討を加えることを足場にするほかありません。遺留品の中には、ある出来事がおこった日時・年代を特定できる性質をもつものがあります。過去と現在をつなぐという意味で、歴史科学にとっても最も重要な証拠です。年代測定は、科学哲学的にみても独特の地位を占めるのではないのでしょうか。ここでは、原日本列島の 5 億年の形成史について、ジルコンという鉱物を用いたウラン-鉛局所年代測定法によるデータを軸に、現時点でわかっていることを整理します。

原日本列島

昔この辺りは海だったそうですが本当ですかと訊かれると、私のように 1 億年以上もの太古の地球のことを研究している者は大変困ってしまいます。というのも「この辺り」というのが、同じ緯度・経度の指し示すこの辺りのことなのか、それとも、今この地下にある岩盤がかつてあった辺りのことなのか明らかでないからです。実際、1,500 万年前より若い岩石が磁氣的に記録している北の方位は現在と同じなのですが、2,000 万年以前の岩石は、中国地方のもので東へ 50° 、東北地方のもので西へ 40° 程度ずれていて、このことから、2,000 万年～1,500 万年前頃、西南日本は時計回りに 50° 、東北日本は反時計回りに 40° 回転して、日本列島は観音開きのように大陸から引き離されたと考えられています(文献 1)。日本海を閉じて 2,000 万年以前の状態に戻すと、日本列島はもはや「列島」でさえもなく、むしろ、屋台骨を構成する基盤岩類の大部分は、大陸の縁で形成されたものです(図 1)。このような認識から、アジア大陸東縁にあって日本列島のもととなった岩石から構成される地帯を「原日本列島」と呼ぶようになりました。

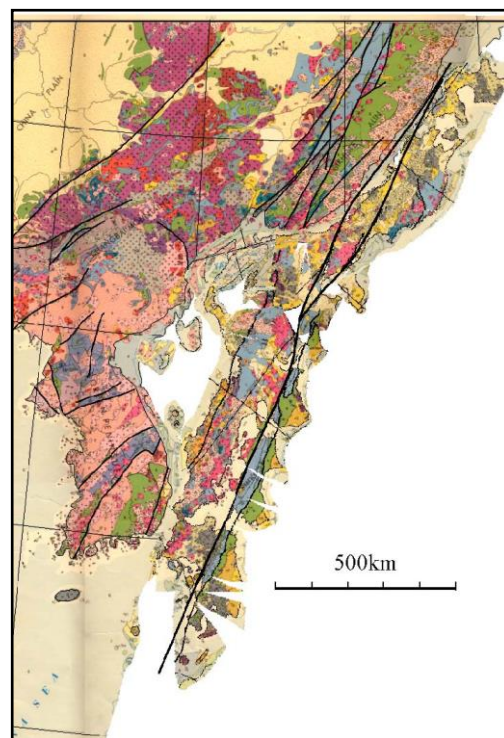


図 1. 2,500 万年前頃の原日本列島の復元の一例(早坂原図)

その中のあるものは確かに海底で形成されたものです。中には山口県の秋吉台の石灰岩のように、珊瑚礁を携えた南洋の島が海洋プレートに乗って何千 km も旅をして、海溝付近で陸から流れてきた砂や泥と混じり合いながら原日本列島にくっついたものもあります。およそ 1 億年より前の原日本列島の大半は、こうしてできた付加体と呼ばれる地質体から成っていて、最も古いものでおよそ 5 億年前に形成され、2~1.5 億年前のジュラ紀に形成されたものが一番広く分布しています。

図 2 に中国、近畿、四国地方の基盤岩類の地質図を示します。空白(白抜)になっている部分は、およそ 5 千万年前より若い地層や岩石から成っています。同図には中央構造線と呼ばれる大断層を赤線で示していますが、中央構造線を境にその北側と南側で地質が全く異なっていることがわかります。中央構造線の北側を西南日本内帯、南側を西南日本外帯と呼びます。西南日本内帯の地質は、白亜紀中頃のおよそ 1 億~8 千万年前頃におこったマグマの活動によって一変します。地表は数千 m もの厚さの火山岩類で覆い尽くされ、地下には花崗岩質のマグマが大量に貫入しました。図 2 の赤系統の色はこの頃に形成された花崗岩類を、淡黄桃色と黄緑色は火山岩類を示します。同時代の外帯ではそのようなマグマ活動は一切おこらず、四万十帯と呼ばれる付加体や、それが地下 20 km 以上も深く潜ってできた低温高压型の変成岩からなる三波川帯が形成され、今も広く分布しています。

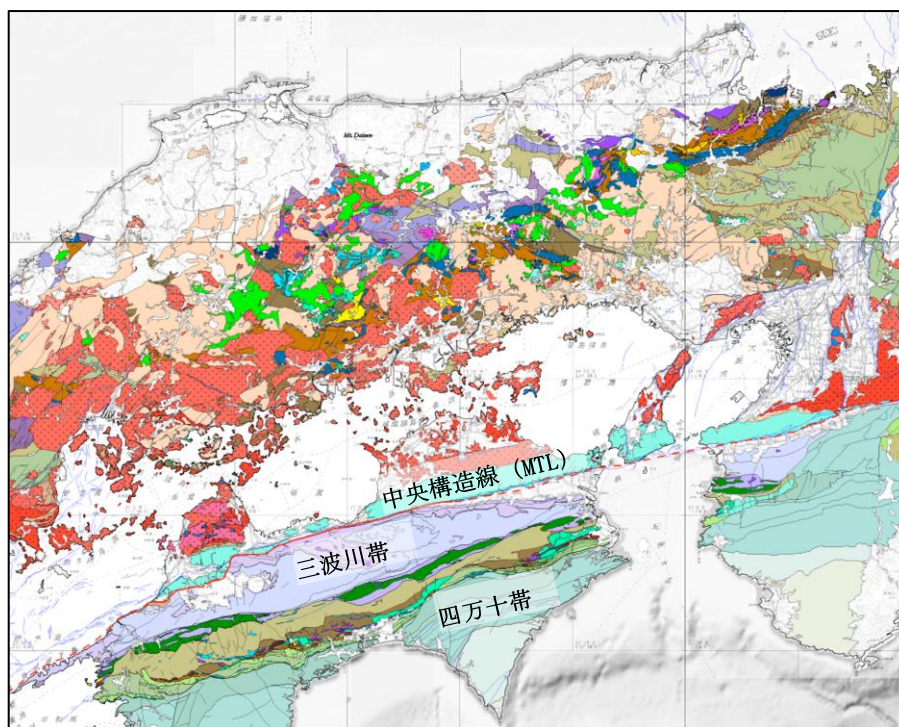


図 2. 中国、近畿、四国地方の基盤岩類の地質図(早坂原図)

やがて地表は削剥され、火山岩の下に隠れていた花崗岩やそれより古い付加体が顔を覗かせるようになりまし。白亜紀の火山岩や花崗岩(火成岩類)は中国地方に広く残されているのですが、それらを取り除くと、古い付加体の分布は点的になります。それでも、それらをテレーンというカテゴリーで分類して広域的に対比すると、白亜紀より古い時代の大構造が見えてきます。こうして復元された西南日本の古い時代のテレーン区分図を図 3 に示します。テレーンというのは、一つの歴史的なまとまりを持った地質体のことで、隣り合う別々のテレーンは常に断層で境され、それぞれ異なる歴史を持っています。つまり、テレーン境界となっている断層は、両隣の歴史的関係が良くわからなくなるほど大きなズレを引きおこしたことを意味します。

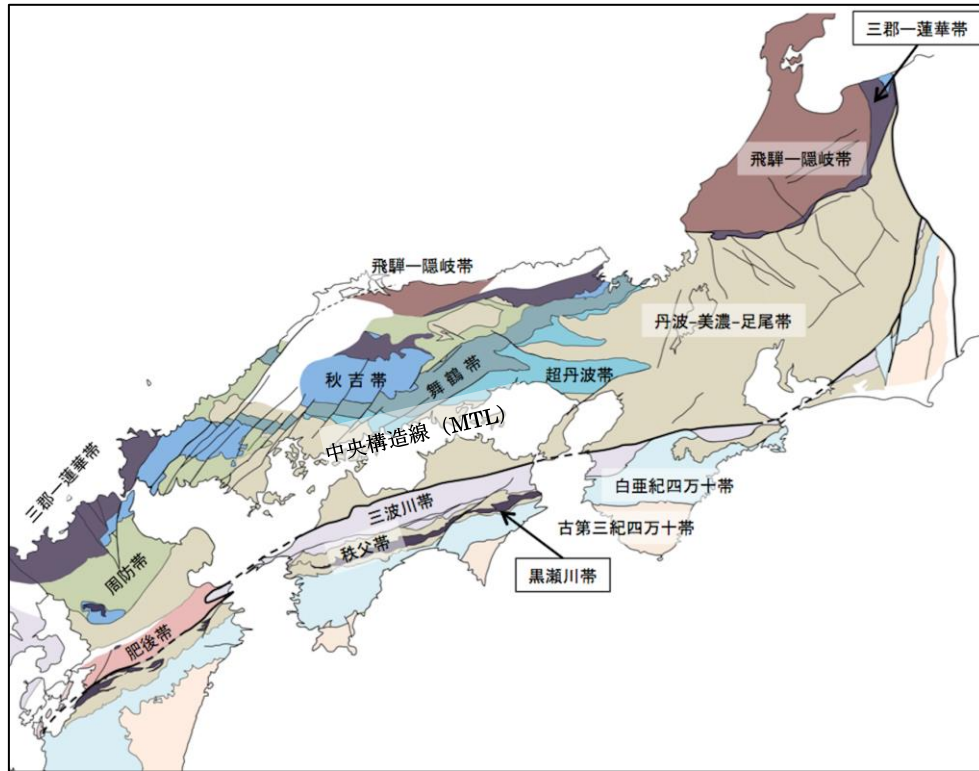


図 3. 西南日本のテレーンマップ(早坂原図)

図 3 の飛騨-隠岐帯は、原日本列島の中では最も古い大陸地塊の断片です。かつてこの前面に海溝が存在していて、5 億年前頃以降いろいろな時代に付加体や高压変成岩が形成され、原日本列島は次第に海洋側へ拡大していったと考えられています。例えば、三郡-蓮華帯は 3 億年前頃に海溝から深く潜って形成された低温高压型の変成岩からなり、秋吉帯、舞鶴帯、超丹波帯は主に 2.7~2.5 億年前頃(ペルム紀の中・後期)に形成された付加・衝突帯で、周防帯は 2.5~2.2 億年前頃(トリアス期前・中期)に形成された低温高压型の変成岩、丹波-美濃-足尾帯と秩父帯は 2~1.5 億年前(ジュラ紀)に形成された付加体、四万十帯は 1.2 億年前(白亜紀前期)以降に形成された付加体、といった具合です。

以上のことは、1990 年代までには明らかにされていたことですが、これらのテレーン相互の歴史的関係、つまり全体の大構造がどのようなプロセスを経て形成されたのかについては、今でも良くわかっていないことが多いのです。

ジルコン年代学

先に述べましたように、歴史科学である地質学にとって岩石の年齢は最も重要なデータです。堆積岩であれば、化石から相対的な前後関係を推定することができます(相対年代)。一方、化石を含まない火成岩や変成岩では放射性元素を用いた種々の同位体年代(絶対年代)測定法が古くから活用されてきました。それらの中で、私の研究対象のような数千万年より古い時代の試料には、主にルビジウム-ストロンチウム(Rb-Sr)法、カリウム-アルゴン(K-Ar)法、サマリウム-ネオジウム(Sm-Nd)法、ウラン-鉛(U-Pb)法が適用され、入手可能な試料や目的に応じて使い分けられてきました。その全てに携わった経験から言うと、ジルコンに U-Pb 局所年代分析法を適用した手法の威力は抜群です。それにはいくつかの理由があります。

第一に U-Pb 法の特徴からくる利点があります。この手法で用いられるウランの同位体にウラン 238(²³⁸U:半

減期約 45 億年)とウラン 235 (^{235}U :半減期約 7 億年)の二種類があり、これらが放射壊変をくり返して、最後に、それぞれ鉛 206 (^{206}Pb)と鉛 207 (^{207}Pb)という同じ元素の同位体になって安定します。このことは、ウランが、独立に時を刻む二つの時計を持つということを意味します。もし、ウランを含む鉱物が結晶化した後、現在に至るまで元素移動のない理想状態を保ち続けたとしたら、結晶化の年代を示す二つの時計は全く同じ時刻を示すでしょう。このことによって得られたデータの信頼性が吟味できます。

第二に、ジルコン (ZrSiO_4)という鉱物の特性があげられます。ジルコンはダイヤモンドのイミテーションにも使われるほど硬くて、熱にも機械的摩耗や化学的変質作用にも堪える強靱な鉱物で、結晶化した時の年代(具体的には同位対比)を強固に保持します。短期間であれば 900°C の高温を経験しても年代がリセットされないとされています。ウランはジルコン中に四価の陽イオンとしてジルコニウム (Zr)を置換し、数十～数千 ppm、希には数%含まれます。これが放射壊変して最後に鉛になるので、ジルコン中のウランの同位体と鉛の同位体の比を測定することでその結晶化年代が計算できます。もし最初から鉛を含んでいたらその補正がやっかいです。ジルコンの結晶には二価の陽イオンを含むサイトがないので、初期鉛は無視できるほどしか含まれません。

第三に、試料の数十 μm 以下の領域の年代を測定する局所年代分析法の技術革新があげられます。1980年代前半にオーストラリア国立大学の附属施設でジルコン一粒の年齢を正確に測定する高感度高分解能二次イオン質量分析計 (SHRIMP)が開発・実用化され、これを用いた研究によって、特に大陸地殻形成の初期の状況についての新しい事実が次々と明らかにされました。広島大学の私共の教室では、この市販機種 (SHRIMP-II)をいち早く導入し(1996年)、数々の実績をあげてきました。21世紀になるとレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計 (LA-ICP MS)を用いての迅速な測定が可能になり、砂岩に含まれる砂粒としてのいろいろな年齢のジルコンを 100 粒子以上も測定して、砂粒の供給源地の情報を得ることも可能になりました。以下、ジルコンの U-Pb 局所年代分析によって明らかにされた最近の成果をトピック的に紹介します。

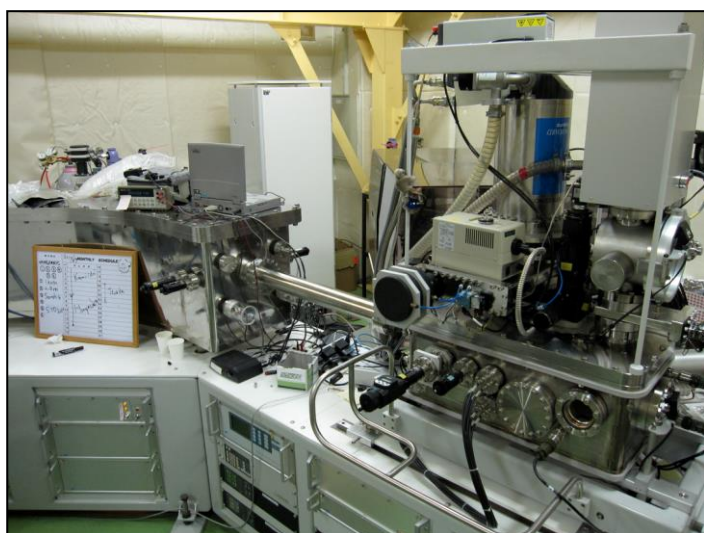


図 4. 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻の SHRIMP II

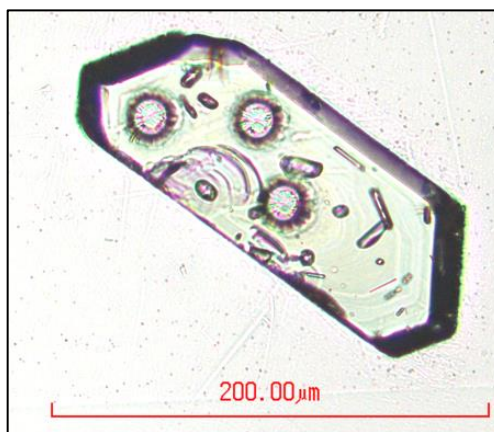


図 5. LA-ICP-MS によって測定された後のジルコン結晶
直径 $25 \mu\text{m}$ のビーム痕が 3 箇所に付いている。

日本最古の岩石

島根県隠岐島後の片麻岩は 16 億年より古いジルコンだけを含むので、その原岩の砂岩は 16 億年前頃堆積したと考えられますが、正確な形成年代はわかっていません。これは国立科学博物館の堤之恭さんが私共の教室に院生として在籍していた時の成果です。年齢のはっきりと分かっている日本最古の岩石は、庄原市の西

城に露出するハンレイ岩で、5.45 億年(先カンブリア代最末期)の年齢を示します。これは、私のゼミに在籍していた木村光佑君の本年3月に提出された博士論文によって明らかにされた成果です。その化学的特徴から、当時のパンサラッサ海と呼ばれる古太平洋の海洋底で形成されたと考えられました。日本列島に産するジルコン粒子で最も古いのは、およそ 37.5 億年前のもので、富山県黒部市宇奈月の 2.3 億年前に貫入した花崗岩中に見つかったものです。これは国立極地研究所の堀江憲路さんが私共の教室に PD として在籍していた時の成果で、花崗岩のマグマの元となった地殻物質に含まれていたジルコンが溶け残ったものと考えられました。

中央構造線による変位量

図 2 と図 3 に示した中央構造線 (Median Tectonic Line: MTL) は西南日本を内帯と外帯へ分ける地体構造の境界をなす、日本列島で最も大規模な断層ですが、規模が大きすぎていまだにその変位量(ずれた距離)はわかっていません。私は現在、ジュラ紀付加体の砂岩に含まれる碎屑性ジルコンの年齢を多数の試料で何千粒も測定して MTL の両側で比較し、その変位量を推定するという研究を行なっています。碎屑性ジルコンというのは砂岩などの碎屑岩に砂粒として含まれるジルコン粒子のことです(図 6)。碎屑岩は陸上にあった岩石が風化・削剥されて砂や泥となったものが川から海や湖へ運ばれて堆積したものであるため、その中に含まれるジルコン結晶は、堆積当時、近くにあった陸上の岩石に含まれていたものに違いありません。堆積場に砂や泥を供給する陸地のことを後背地(こうはいち)と呼びますが、碎屑性ジルコンの年齢構成は、堆積時代に付近にあった後背地の岩石の年齢構成を反映したものになるでしょう。海溝底では海溝軸に沿った軸流と呼ばれる海流があって、碎屑粒子は広範囲に攪拌されるので、海溝付近で形成される付加体中の碎屑性ジルコンの年齢構成は、広範囲に類似のものになると予想されます。

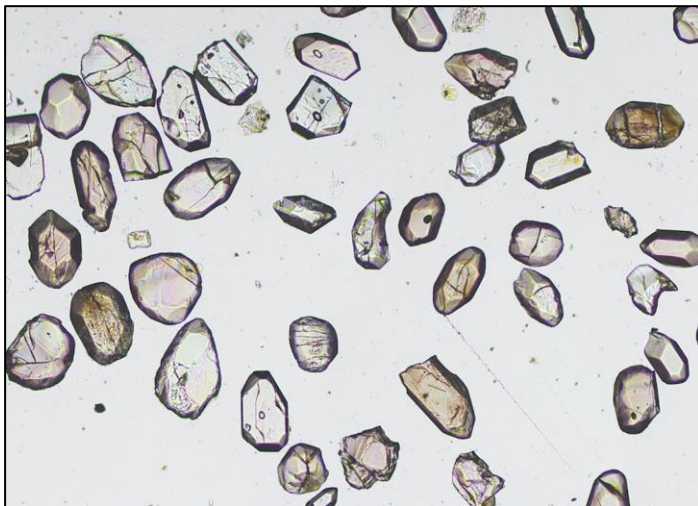


図 6. 碎屑性ジルコンの顕微鏡写真
横幅は約 1 mm. 50 グラムの砂岩からおよそ 500 粒のジルコンが得られる。淡赤褐色のものは 10 億年より古いものであることが多く、無色に近いものは 5 億年より若いものであることが多い。一般にウランの含有量が多いほど、また年齢が古いほど色が濃くなる。

実際、西南日本内帯の前期ジュラ紀の付加体から得られた碎屑性ジルコンの年齢構成は、どこでも図 7 の上段に示すようなパターンになります。ところが同時代の西南日本外帯のものは、同図の下段に示すように全く違います。このことは、ジュラ紀前期において、内帯の付加体と外帯の付加体が全く異なる遠く離れた場所で形成された(付加した)ことを意味します。現在それらが中央構造線の南北両側に並列しているのは、とりもなおさず、中央構造線のずれによるということになります。いったいどれくらいずれたのか。2000 km ずれたという説

もありますが、今後ジルコンの年代データを増やして変位量を具体的に突き止めたいと考えています。

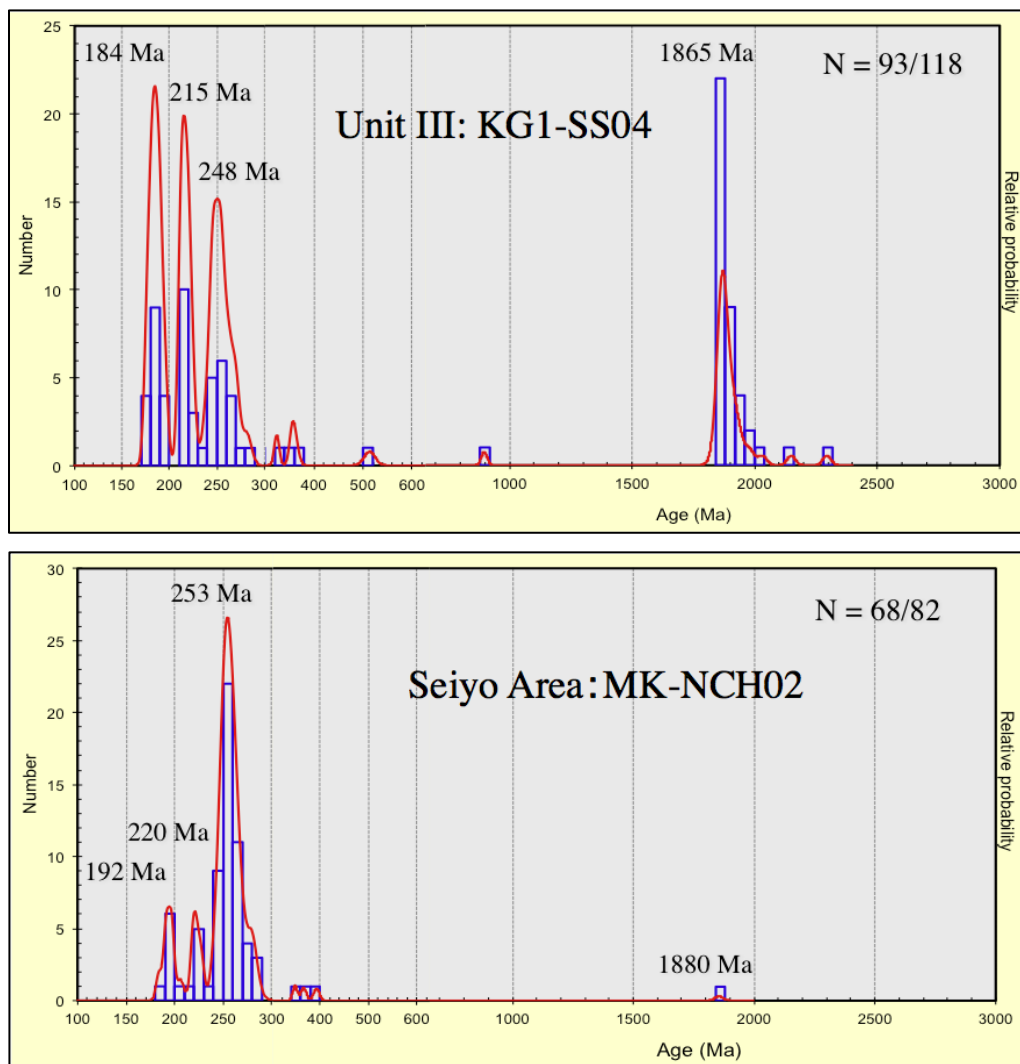


図 7. 西南日本の前期ジュラ紀付加体に含まれる碎屑性ジルコンの U-Pb 年齢分布
 上段は山口県岩国市の玖珂層群ユニット III, 下段は愛媛県西予市の秩父帯北帯のもの。
 縦軸はジルコンの粒子数, 横軸は年齢で, 単位 (Ma) は 100 万年前 (1000 Ma は 10 億年前)。
 「N = 92/118」は, 118 粒子を測定し, その内 92 粒子で正常な年代データが得られたことを意味する。

中国地方の白亜紀火成活動

既に述べたとおり, 西南日本内帯の, 特に広島県をはじめとする中国地方には白亜紀中頃の花崗岩類や火山岩類が広く分布します (図 2)。ちなみに, 昨 2016 年 5 月に地質学会の呼び掛けで各都道府県の石が決められ, 広島県の「県の石」は花崗岩ということになりました。図 2 を見れば, 広島県の地質が花崗岩で真っ赤になっていることで納得いただけると思います。ところで, 花崗岩は地下数 km の深所でマグマが固まってできた深成岩で, それが地表に露出するまで削剥が進んだのに, 同時代に地表に流れ出た火山岩が多量に残されているのは不思議なことです。実際, 東広島市の安芸津の海岸には白亜紀の火山岩類が露出していて, それより標高の高い黒瀬に花崗岩が露出しています (図 8)。その謎を解こうということで, 安芸津の三津湾周辺の白亜紀火成岩類についてジルコン年代学を用いた研究をおこないました。

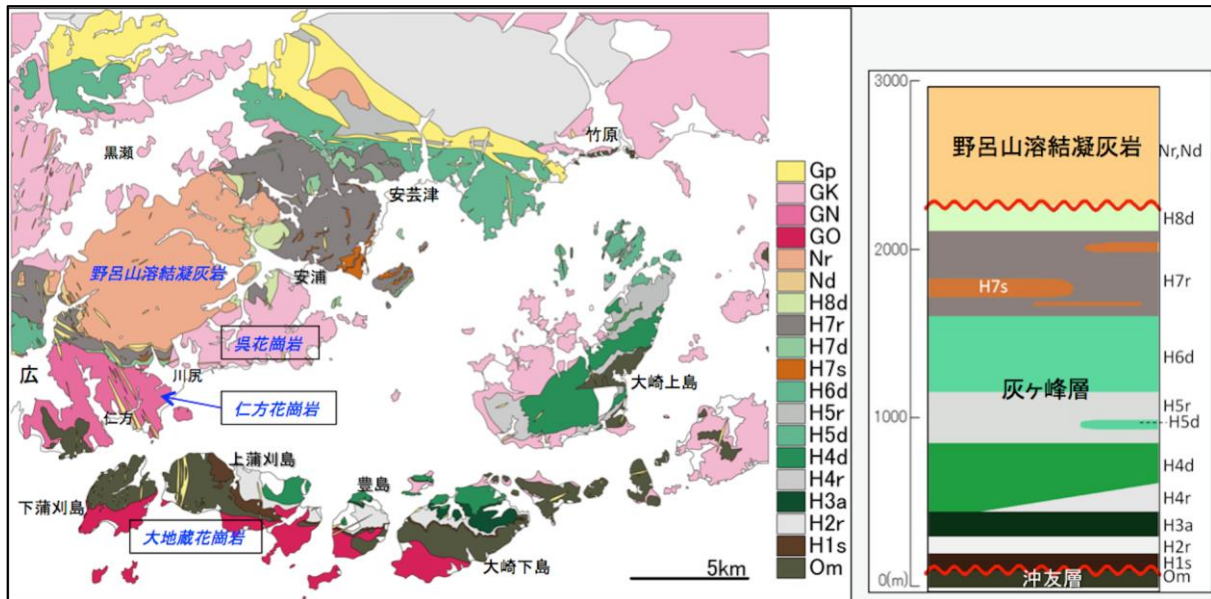


図 8. 広島県の三津湾周辺の地質図(左)と火山碎屑岩類の地質柱状図(右)
 赤～ピンク色(GO, GN, GK)は白亜紀花崗岩類, 黄色(Gp)は花崗斑岩の岩脈, 島嶼部の濃緑
 褐色(Om)はペルム紀付加体の沖友層, それ以外は白亜紀火山碎屑岩類で, 下部の灰ヶ峰層
 と上部の野呂山溶結凝灰岩からなる。

図 8 の右側に, 三津湾周辺から野呂山山頂にかけて分布する火山岩, 火山碎屑岩類の重なりを示す地質柱状図を示しています. 火山碎屑岩類というのは, 火山灰が降り積もってできる凝灰岩に代表される岩石で, 鹿児島島のシラス台地のように, 大規模なものほとんどは巨大な火砕流によって形成されます. 三津湾周辺ではそのような火砕流堆積物が何枚も重なって, 合計 3,000 m の厚さ達しています. また, その中ほどには湖の堆積物(図 8 の H7s)が挟まれます. この地域の全ての岩石種からジルコンを分離してその年代を測定したところ, 次のようなことがわかってきました.

まず, 9,600 百万年前頃に小規模の火山活動が始まり, その後度重なる大規模火砕流の噴出で, およそ 50 万年後には 1,600 m の厚さになりました. おそらく九州の阿蘇高原やシラス台地のような火砕流台地が形成されていたことでしょう. そこへ突然, 湖の堆積物が現れます. これはもう, カルデラ陥没がおこってカルデラ湖が形成されとしか考えられません. さらに 100 万年ほど火山活動が続き, 一旦 300 万年間の休止期をおいた 9,150 百万年前頃, 突然, 厚さ 700 m 以上の野呂山溶結凝灰岩が噴出します. 一度に厚さ 700 m もの火砕流が噴出することは考えられないので, 野呂山溶結凝灰岩の最下部と最上部の年代を測定しましたが, 今のところ年代差は検出されていません. また, 深成岩である花崗岩が野呂山溶結凝灰岩の上部層にまで貫入しているので, さらにその上を 1,000 m 以上の火山岩類が覆っていたと考えられます.

結局, これらの火山岩類は, かつてカルデラ陥没によって落ち込んだ所に削剥を免れて残されたのだと結論しました. また, 削剥される前の中国地方は, 厚さ 4,000 m もの火山岩類で覆い尽くされていたこともわかりました. まるで見えてきたように書きましたが, 嘘ではありません.

文献

- 1) OTOFUJI Y., MATSUDA T. & NOHDA S. 1985. *Nature* **317**, 603-604.