

安間 了¹・松田 高明^{◆2}・Richard Armstrong³

¹筑波大学地球科学系

²熊本大学理学部

³オーストラリア国立大学

◆deceased

1. はじめに

花崗岩の生成と貫入プロセスは、マグマの生成・集積にはじまって、マグマ（結晶粥）の上昇、浸食レベルに達する最終的な岩体の定置にいたるまでの広い範囲をふくむ。数値計算などによると直径 5 km 程度の安山岩質マグマが上昇を開始してから地殻内で定置するのに要する時間は百万年（1 Ma）を越えないオーダーであると予測されている（たとえば Marsh, 1982）。しかし、これは既存のマグマ溜まりが固結する前にダイアピル的に上昇しうる期間だけを見積もったものであって、上昇しはじめるに十分な浮力を持つ体積のマグマが地下で集積するのにどの程度の時間を要するのか、マグマが上昇を開始し定置・冷却するのに、どの程度の時間がかかるのか、火成作用の継続期間をひとつの岩体から実測した例は少ない。本研究の目的は、ウラン＝鉛年代値とフィッシュントラック年代値を比較することによって、屋久島花崗岩の生成と貫入プロセス全体にわたる火成作用の継続期間を見積もることである。

屋久島花崗岩からは、既にいくつかの年代測定値が報告されている。Shibata and Nozawa (1968) は、屋久島花崗岩から分離した黒雲母について K-Ar 年代測定法を適用し、岩体東部の 2 箇所 14±1 Ma、岩体北部で 13±1 Ma の年代を得た（安間・坂本・Ferre・Abdeldayem、本報告の図 1）。その後、通商産業省資源エネルギー庁（1992）は、全岩および黒雲母を用いて、岩体周縁部全域をカバーする K-Ar 年代測定を行った（前述安間ほか、本報告の図 1）。ただし、全岩 K-Ar 年代測定法では岩石が生成したときまでに ⁴⁰K の放射性壊変によってもたらされていた過剰 ⁴⁰Ar の影響によって年代が古く見積もられることが多い。資源エネルギー庁の年代測定でも 1 箇所だけ 25.1 Ma という古い年代が得られており、過

剰アルゴンの影響であることが示唆されている。

そこで、この研究では、黒雲母 K-Ar 法の閉鎖温度（300℃）とほぼ近い閉鎖温度をもつフィッシュントラック法を用いて、花崗岩貫入時の冷却速度の見積もりを行った。フィッシュントラック法の閉鎖温度は、化学組成や平衡状態、圧力などに依存せず、温度（+冷却速度）のみに依存していると考えられており、ジルコンを使った場合は 200℃程度、アパタイトの場合、100℃程度とされている。

フィッシュントラック法は、K-Ar 法の場合のように変成・変質・風化などによるアルゴンの喪失や、過剰 ⁴⁰Ar の存在に類似した年代値への影響を受けないので、冷却年代の記録者としてはより素性がはっきりしていると思われる。従って、低温側での冷却速度を見積もったり、K-Ar 年代値をクロスチェックする上で重要である。

K-Ar 法もフィッシュントラック法も、花崗岩質マグマ（結晶粥）が定置した後の冷却年代を与えるが、マグマがいつ生成し、いつ頃に結晶化をはじめたかという情報は、より高い閉鎖温度をもつ年代測定法に頼らなければならない。ジルコンを用いたウラン＝鉛測定法はジルコンが（600℃以上の温度で）結晶化した年代を表すと考えられている。ここでは、屋久島花崗岩マグマの結晶化年代を見積もるために、近年もっとも信頼を得ている Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP) を使用して、ジルコンのウラン＝鉛年代測定を行った。

2. 方法

2-1. 鉱物分離

ジルコンとアパタイトの年代測定用鉱物試料は、岩石試料を粉碎し、粒度をそろえた後に、磁性分離と重液分離を繰り返す一般的な

手法を用いて分離された。鉱物分離には、九州大学地熱開発センター（旧）のシステムを使用した。

およそ 3 Kg から 5 kg の花崗岩岩石試料をジョークラッシャーとディスクラッシャーで粉碎し、60 メッシュのふるいを通して細粒部分を回収した。これを懸濁液がある程度透明になるまで水洗いすることによって、極細粒部を洗い流し、粒度をそろえた。椀かけによって、100 g から 300 g 程度まで重鉱物濃集部分を集めた後、ハリモンド型磁力選別器で強磁性鉱物を取り除き、比重 2.85 g/cm^3 に調整したプロモホルムで重鉱物を分別した。このあと、アイソダイナミック磁力選別器で常磁性鉱物を取り除き、最終的に比重 3.85 g/cm^3 に調整したクレリシ液でアパタイトフラクションとジルコンフラクションを分別した。

すべての行程で、汚染による鉱物の混入を防ぐため、機材の清掃を入念に行い、同じ試料を本番前に分離ラインに通すことによってラインの洗浄を行うように心がけた。

屋久島に分布する花崗岩類の中ではストロンチウム初生値の比較的低い、中粒黒雲母花崗岩の主岩相 (YMG) から 19 試料、含堇青石中粒黒雲母花崗岩の周縁相 (YMF) から 2 試料、中央部に分布する含堇青石中央花崗閃緑岩 (吉田型花崗閃緑岩 (YYG) あるいは CGD : Sato et al., 1982; Anma et al., 1998) から 2 試料、アプライトと石英斑岩脈から 1 試料ずつ、計 25 試料からジルコンとアパタイトを分離した。このうち十分な量のジルコンが分離できた主岩相の 19 試料、周縁相の 1 試料、中央花崗閃緑岩の 1 試料の計 21 試料について年代測定を行った。それぞれの岩相の詳しい説明や化学分析値などについては、Anma et al. (1998) を参照されたい。

2-2. フィッショントラック法

2-2-1. 原理と方法

ウランウムよりも質量数の大きな元素は確率的には非常に小さいが、自然発生的に核分裂を起こす。これを自発核分裂と呼び、その壊変定数は ^{238}U の場合、 $6.85 \times 10^{-17}/\text{year}$ 程度とされている。核分裂がおこると、200 MeV という大きなエネルギーを放出して、通常 2

個 (0.3 % の確率で 3 個) の核分裂片が反対方向に飛び、ウランなどを含む結晶内部の格子構造を破壊して、幅数 nm、長さ十数 μm の飛跡 (fission track) を残す。このトラックは適当な薬品でエッチングすることによって、光学顕微鏡で観察可能な大きさとなる。

自発核分裂を起こす各種の中では、ウランウムの存在度が大きいので、通常ウランウムの含有量が問題となる。自発核分裂トラック密度は、結晶中の ^{238}U 濃度と自発核分裂壊変定数、 α 壊変を含めた全壊変定数 ($1.55125 \times 10^{-10}/\text{year}$) および生成したトラックが焼きなまされずに保存される温度 (閉鎖温度) に達したときからの年数で決定される。壊変定数は既知の定数であり、自発トラック密度は一定面積中のトラック数を鏡下で計数することによって得られる。年代を得るために必要な残る未知数のウラン濃度は、 ^{238}U との存在比が知られている ^{235}U ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 7.252 \times 10^{-3}$) が熱中性子線を照射されると誘導核分裂を起こすという性質を利用して求める。

ここで採用したフィッショントラック年代測定法は、現在もっとも一般的に用いられる、結晶内部面を使った外部検出器法 (ED1) である。この方法では、はじめに年代測定試料をエッチングするため、エッチャントに腐食されないマウント材に埋め込み、さらに結晶の内部面を出すためにダイヤモンドペーストで研磨を行った。この後、樹脂にマウントしたアパタイト試料は 20°C の HNO_3 で、PFA テフロンに埋め込んだジルコン試料は $\text{KOH} + \text{NaOH}$ の 225°C 共融液を用いて、それぞれ自発トラック幅が $1 \mu\text{m}$ 程度に広がるまでエッチングを行った。エッチング後、外部検出器のルビーマイカを試料に貼り付け、原子炉内で熱中性子線を照射して誘発トラックを生じさせた。 20°C の 46 % HF を用いてマイカ上に残された誘発トラック幅が $1 \mu\text{m}$ 程度に広がるまでエッチングを行い、誘発トラック密度を計測し、下に見積もられた熱中性子線量を用いて試料中のウラン濃度を計算した。

原子炉内で照射した中性子線量の見積もりには、National institute of Standards and Technology (NIST) が提供している標準ガラス SRM 612 と Institute for Reference

Materials and Measurements (IRMM) 提供の IRMM 540 標準ガラスを用いた (表 2)。これらの標準ガラスのウラン含有量は、それぞれ 0.002392 % と 0.007277 % である (松田、1999)。既知のウラン濃度をもつ標準ガラスに貼り付けたルビーマイカ外部検出器に記録された誘発トラック密度をもとめることによって、熱中性子線量が見積もられる。中性子線の照射は、京都大学原子炉の黒鉛照射施設 (熱中性子フラックス: $4 \times 10^{11}/\text{cm}^2\text{sec}$, Au に対する Cd 比: 約 200) を利用した。ジルコン試料については 40 分、アパタイト試料については 2 時間の中性子線照射を行った。照射後、外部検出器を 20 °C の 46 % HF で 20 分間エッチングした。

フィッシュントラック年代は、最終的に次式で求められる。

$$t(\text{year}) = 1/\lambda_{238} \ln \{1 + (\lambda_{238}/\lambda_f \times \rho_s^{238}/\rho_i^{235} \times I\Phi\sigma)\}$$

ここで、 ρ_s^{238} は自発トラック密度 (n/cm^2)、 ρ_i^{235} は誘発トラック密度 (n/cm^2) である。 λ_{238} と λ_f はそれぞれ ^{238}U の全壊変定数 ($1.55125 \times 10^{-10}/\text{year}$) と核分裂定数 ($6.85 \times 10^{-17}/\text{year}$ などの値が報告されている)、 Φ は熱中性子線量 (n/cm^2)、 I は ^{235}U の核反断面積 ($580.2 \times 10^{-24} \text{cm}^2$)、 σ は ^{235}U と ^{238}U の存在比 (7.252×10^{-3}) である (林・渡辺、1980)。

すべての FT の計数は、NIKON MICROPHOTO-SA に X 100 の dry 対物レンズを取り付け、全倍率 x 925 で行った。トラックの計数は 2000 年に松田が姫路工業大学で行った。

2-2-2. ゼータ (ζ) 補正

フィッシュントラック数は鏡下で計数されるので、一般に数千オーダーでしか計数されない。このため、統計的な年代誤差はほかの手法によるよりも大きくなる。また、熱中性子線線量の見積もりにも不確定さをとまう、トラックの認定は測定者に大きく依存するため、測定者による年代の較差が大きくなるという不利がある。さらに、自発核分裂定数は異なる値がいくつか報告されており、使用された自発核分裂定数によっては年代値に 20 % 程度の差をもたらす。このような問題点を解決するため、ゼータ (ζ) 補正法を使用することが勧告されている (Hurford, 1990)。

ゼータ値は次式のように定義される。

$$\zeta = I\Phi\sigma/\lambda_f\rho_d$$

ここで、 ρ_d は熱中性子線量測定用標準ガラスの誘発トラック密度である。ゼータ値を使用すると、年代測定式は次式のように単純化される。

$$t(\text{year}) = 1/\lambda_{238} \ln \{1 + (\zeta \times \lambda_{238} \times \rho_d \times \rho_s^{238}/\rho_i^{235})\}$$

ゼータ法を使用すれば、熱中性子線量や自発核分裂壊変定数などを直接求める必要がなくなるという利点がある (兼岡、1998)。

ゼータ値は、K-Ar 法などによって年代 (t_{std}) が求められている年代標準試料を、未知試料と同様の手順で準備し、同一の熱中性子線照射を行い、年代標準試料に対するフィッシュントラック密度比 ($\rho_s^{238}/\rho_i^{235}$)_{std} を計測することにより、次式を使って算出した。 $\zeta = \exp(\lambda_{238} \times t_{\text{std}})/\lambda_{238} (\rho_s^{238}/\rho_i^{235})_{\text{std}} \rho_d$

本報告で使用されたゼータ値の算出データを表 1 に示す。年代標準試料としては Fish Canyon tuff ($27.8 \pm 0.2 \text{ Ma}$)、Durango apatite ($31.4 \pm 0.5 \text{ Ma}$)、Buluk tuff ($16.3 \pm 0.2 \text{ Ma}$)、Tardree rhyolite ($58.7 \pm 1.1 \text{ Ma}$) を用いた (Hurford and Green, 1983; Hurford and Watkins, 1987)。ゼータ値は測定ルーチンや使用された原子炉などに依存する測定者固有の値である。表 1 は屋久島花崗岩試料の年代測定に使用された、京都大学原子炉黒鉛照射施設についての松田のゼータ値である (注 1)。本報告では、アパタイトについては 300.6 ± 8.8 を、ジルコンについては 386.3 ± 23 (Matsuda et al., 1998) のゼータ補正值を用いた。

2-3. ウラン=鉛法

鉛には放射性同位体起源のものを含む ^{208}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb と、放射性起源同位体を含まない ^{204}Pb の同位体存在度が知られている 4 つの安定同位体がある。このうち、 ^{206}Pb は ^{238}U の放射性壊変 (壊変定数: 0.155125×10^{-9}) によって、 ^{207}Pb は ^{235}U (壊変定数: 0.98485×10^{-9}) の、 ^{232}Th の放射性壊変 (壊変定数: 0.049475×10^{-9}) によって生成する。

年代は親核種と娘核種を含む安定同位体を計測することによって、次の一般的な関係式から求められる。

$$D/D_0 = (D/D_0)_0 + (D/D_0) [\exp(\lambda t) - 1]$$

ここで、D は娘核種 D の現在の量、D₀ は放射壊変には直接関与しない娘核種の安定同位体 D₀ の現在の量、(D/D₀) は時間 t = 0 における安定同位体初生値、λ は壊変定数である。U-Th-Pb 系列年代測定法の原理は古くから知られており、壊変定数ももっとも正確に決定されている。詳細な説明は兼岡 (1998) などを参照されたい。

測定用試料の準備は次の手順で行った。ウラン鉛年代測定用のジルコン試料を、年代標準試料として使用されるスリランカ産 SL13 ジルコン (572 Ma, 238 ppm)、ミネソタの Duluth complex 産ジルコン FC1 (1099 Ma: Paces and Miller, 1993) とともに径 25 mm の樹脂に埋め込む。結晶の中心面を出すように、ダイヤモンドペーストで研磨した。これをエタノール、イソプロパノール、希釈した HCl で洗浄した後、UNIVEX 300 を用いて 50 Å 程度の厚さに金蒸着を行った。

測定はオーストラリア国立大学 (Australian National University: ANU) 設置の SHRIMP II を用いて行った。測定条件は Claoue-Long et al. (1995) に従った。SHRIMP II ではジルコン試料表面をとばす酸素レーザー径を 20 μm 程度までしぼることができるので、ジルコン単結晶の微小領域の年代測定を行うのに適している。年代測定前にカソードルミネッセンス (CL) 像を走査型電子顕微鏡を用いて撮影し、結晶形と CL 像をもとに、測定個所を選定した。⁹⁰Zr 濃度をモニターするために 2 秒、²⁰⁴Pb を 8 秒、²⁰⁴Pb のバックグラウンドを 8 秒、²⁰⁶Pb を 20 秒、²⁰⁷Pb を 25 秒、²⁰⁸Pb を 5 秒、²³⁸U を 10 秒、²⁴⁸ThO を 5 秒、²⁵⁴U を 2 秒の順番で測定し、これを 5 回繰り返して 1 ポイントの年代を出す。未知試料 3 ポイント毎に標準試料 FC1 の計測を行い、補正を行った。計測中、標準試料の年代はほぼ期待値 (1099 Ma) を示した。データの解析には、Ludwig (1999) の ISOPLOT/EX を用いた。

3. 結果と考察

3-1. 鉱物分離

25 の岩石試料からジルコンとアパタイトの分離を試みた結果、主岩相 (図 1) では 160 mg

から 520 mg のジルコンフラクションと 140 mg から 800 mg のアパタイトフラクションが回収された。他の岩相からは、数十 mg から 250 mg のジルコンフラクションと 70 mg から 200 mg 程度のアパタイトフラクションが回収された。処理した試料重量、挽かけ時の処理の仕方によって最終的な回収物の量は変化するし、それぞれのフラクションは完全に単離されたものではないが、一般に主岩相では、ジルコンやアパタイトをより豊富に産出する。アパタイトのジルコン結晶含有量は非常に少なかった。

3-2. フィッショントラック年代

ジルコン FT 年代は 21 箇所から、アパタイト FT 年代は 20 箇所から求められた。データを表 2 に、試料採取地点および標高を表 4 に、地図上での年代分布を図 1 に示す。ジルコン FT 年代のもっとも古いものは 15.6 Ma、もっとも若いものは 13.3 Ma で平均値は 14.2 Ma であった。アパタイト FT 年代は、7.5 Ma から 11.4 Ma までの年代幅を持ち、平均値は 9.4 Ma であった (注 2)。

ジルコン FT の閉鎖温度はほぼ 200°C、アパタイト FT の閉鎖温度は約 100°C であることが知られている。もし、花崗岩体が、貫入時のこれらの地熱等温面以浅に定置したならば、等温面を乱して同心円上に冷却年代を記録することが期待される。図 1 からは、そのような同心円上の冷却パターンは見られなかった。

ジルコン FT 年代は、誤差の範囲でほとんど一致するものの、弱い高度に対する相関が見られる (図 2)。この相関は、試料採取地点の高度差およそ 2000 m の冷却にほぼ 1 Ma を費やしたことを示す。地熱等温面の深さが一定であったとすると、このことは年間 2 mm の速さで一様に隆起・浸食が生じたことを示唆する。

アパタイト FT 年代は誤差が大きく、誤差の範囲でほとんど一致するが、その平均値は 9.4 Ma であった。閉鎖温度の異なる 2 つの冷却年代が求められたとき、年代と当時の平均的地熱勾配、隆起速度の関係は次式で表される (Zeitler et al., 1982)。

$$U = \{(\theta_1 - \theta_2) / (A_1 - A_2)\} \times (\Delta T / \Delta Z)^{-1}$$

ここで、U は隆起速度、θ₁ と θ₂、A₁ と A₂

はそれぞれジルコンとアパタイトの FT 閉鎖温度と年代、 $\Delta T/\Delta Z$ は地熱勾配を示す。過去の地熱勾配の見積もりは非常に困難であるが、ここで先に見積もった隆起速度 2 mm/year が一定であったと仮定すると、中期中新世の花崗岩定置時の地熱勾配はおよそ 10°C/km と低かったことになってしまう。この値は花崗岩地域の地熱勾配としては低すぎるので、隆起速度はこの時期に急速に減少したのであろう。

一方、アパタイトの FT 年代から現在に至る平均的な隆起速度は次式で求められる。

$$U = \{(\theta_2 - 10)/(A_2)\} \times (\Delta T/\Delta Z)^{-1}$$

現在良く受け入れられている平均的な島弧の地熱勾配 30°C/km を代入すると、平均隆起速度は 0.3 mm/year となる。屋久島花崗岩は定置後の急速に熱を失い、隆起速度も減少したのであろう。

ただし、安間（本報告）にあるように、屋久島花崗岩に発達する割れ目系は、岩体が完全に固結した後も浮力による上昇が継続していたことを示唆する。これらの定量的見積もりは明らかに不完全であり、岩石の熱伝導率などを勘案した今後の検討を要する。

3-2. ウラン=鉛年代

ウラン鉛年代測定を行ったジルコン結晶の CL 画像と年代測定点、得られた年代値を図 3 に示す。原生代から中生代までの核のまわりに中新世のリムが成長している。Tera-Wasserburg プロット（図 4）上で、コンコーディア曲線にのるものが多く、1 ポイント毎にジルコン晶出年代を正確に議論できるものと期待される。中新世のウラン鉛年代は 16.2 Ma から 10.9 Ma までの年代幅を示す。これらの年代値は、ジルコン FT 年代や K-Ar 年代とオーバーラップしており、花崗岩の生成・貫入・200°C までの冷却のイベントが 3 Ma 程度の短い期間であったことを示唆する。それ以前のもっとも新しい年代はコンコーディアにのる 60 Ma 付近のものである。この年代は吉田型中央花崗閃緑岩から得られた。これらの核の年代分布は、花崗岩母岩の四万十層群堆積岩中のもの（安間・Armstrong、本報告）と類似しており、屋久島花崗岩の生成過程で四万十層群の溶融と混入が大きな影響を及ぼ

したことを示唆する。とくに、中生代の年代をジルコンリムにも保存している吉田型中央花崗閃緑岩でこの傾向は顕著である。一本のディスコーディアにのる試料を選別してコンコーディア図（図 5）にプロットしたところ、上方で 1815 Ma、下方で 19 Ma の点でコンコーディア曲線と交差した。このことは、1815 Ma の原岩年代をもつジルコン結晶が 19 Ma のイベントによって鉛の損失を受けたものと解釈されるかもしれない。しかし、下方での交差年代は誤差が大きく、また 3 Ma 程度の急激で短期間のイベントで鉛の急激な損失が生じるとは考えにくい。それ以前の熱的イベントを反映している、あるいは、ウラン鉛年代はジルコンが晶出する条件にあったときの年代のみを記録しており、実際のマグマの生成・集積過程はもっと長期にわたって継続していた可能性が考えられる。

3-3. 屋久島花崗岩の年代比較

これまで知られている屋久島花崗岩年代測定値の頻度分布を図 6 に示す。全岩 K-Ar 年代測定法は、通商産業省資源エネルギー庁（1992）にも示唆されているように、過剰アルゴンの影響を受けやすいことが知られている。このため、本報告では、黒雲母を用いた K-Ar 年代値のみを比較の対照として議論する。

ウラン鉛年代測定を行った一試料ではアパタイト FT 年代とオーバーラップするものがあつた。この測定点は誤差も大きい、コンコーディアにのっており、ジルコンの晶出が低温側まで継続していたことも視野に入れ、今後の検討を要する。

ジルコン FT 年代は、閉鎖温度が黒雲母 K-Ar 法より低いにも関わらず、古く算出される傾向にあつた。ゼータ補正が適当でなかった可能性もあるので、手法が異なる年代値を用いて絶対年代から議論を展開するときには、注意を要する。これについても今後の検討が必要である。しかしながら、フィッシュトラック年代についてのみいえば、同一測定者による測定なので相対的比較は可能で、前述の議論には大きな影響はないであろう。

5. 結論

屋久島花崗岩のフィッシュトラック冷却年代とウラン鉛年代を得た。アパタイト FT 年代は 7.5 Ma から 11.4 Ma までの年代幅を持ち、平均値は 9.4 Ma であった。ジルコン FT 年代は 15.6 Ma から 13.3 Ma の年代幅を示し、平均値は 14.2 Ma であった。9.4 Ma には 100°C、14.2 Ma には 200°C 程度まで岩体は冷却していた。高度とジルコン FT 年代値との相関、アパタイトとジルコンの FT 年代差から、中新世以降の隆起速度は年間 2 mm 程度のオーダーから、年間 0.3 mm 程度のオーダーまで減少したと見積もられた。これらの定量的な見積もりには、さらなる検討を要する。ジルコン微小領域の年代測定によって、さまざまな年代を示す核のまわりに、16.2 Ma よりも若いリムが成長していることが明らかになった。ジルコン晶出温度からの 200°C 程度までへの岩体冷却には 3 Ma 程度の期間しか要していない。花崗岩の貫入イベントは、急速であった。ジルコン核の年代分布は、母岩の四万十層群の混入・汚染を強く示唆する。

謝辞

屋久島の現地調査にあたり、楠川に在住の牧 義男氏には宿を提供していただいた。屋久島森林環境保全センターには、国有林野・保護林地域の調査に対して快く入林許可を頂き、林道の使用などに便宜をはかっていただいた。屋久島世界遺産センターをはじめ、環境省の関係者には、国立公園内および原生自然環境保全地域内の土石の採取について許可（環九州許第 556 号および環自計許第 192 号）を頂いた。鉱物分離に際して現九州産業大学の林正雄教授とジオクロノロジージャパン（株）の大四雅弘博士にお世話になった。以上の方々に心からお礼申し上げます。

注 1:

松田は 2001 年秋に急逝した。このため、ゼータ補正に関しては残されたデータに基づき、安間が再計算を行った。ゼータ補正值は松田が急逝する直前の 2001 年 7 月 20 日までのものが残されている。松田のゼータ補正值は、後期になるにしたがって大きくなる傾向にあった。

注 2:

ジルコンの FT 年代測定で、数試料が X² テストに失格した。もとのデータが失われたので理由は不明である。ゆっくり冷却した花崗岩の試料なのでリサイクルされたジルコンの混入があっても、完全に焼きなまされるであろう。測定された試料を観察したかぎり、トラック密度にもおおきな差はなかった。このため、X² テストの結果については言及していない。

引用文献

- Anma R, Kawano Y and Yuhara M
(1998) Compositional zoning and its implication in a toroidal circulation inside the Yakushima pluton, SW Japan. In: "Origin and Evolution of the Continental Crust" Memoirs of National Institute of Polar Research, Special Issue, 53: 157-176.
- 安間了・坂本仁・Ferre, E.・Abdeldayem, A.
(2003) 屋久島花崗岩の正長石巨晶定向配列と帯磁率異方性ファブリック. 本報告
- 安間了・Armstrong, R. (2003) 屋久島に分布する四万十層群の碎屑性ジルコンのウラン=鉛年代. 本報告
- 安間了 (2003) 屋久島にみられる割れ目系の発達. 本報告
- Claoue-Long, J.C., Compston, W., Roberts, J. and Funning, C.M. (1995) Two Carboniferous ages: a comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and 40Ar/39Ar analysis. Geochronology Time Scales and Global Stratigraphic correlation, SEPM Special Publication, 54, 3-21.
- 林正雄・渡辺公一郎 (1980) ジルコンによるフィッシュトラック年代測定法. 地熱, 17, 27-37.
- Hurford, A. J. (1990) Standardization of fission track dating calibration - recommendation by Fission Track Working Group of the I. U. G. S. Sub-commission on geochronology. Chem. Geol., 80, 171-178.
- Hurford, A. J. and Green, P. F. (1983)

- The zeta age calibration of fission-track dating. *Isotope Geosci.*, 1, 285-317.
- Hurford, A.J. and Watkins, R.T. (1987) Fission track age of the tuffs of Buluk Member, Bakate Formation, northern Kenya: a suitable fission track age standard. *Chem. Geol.*, 66, 209-216.
- Galbraith, R.F. (1981) On statistical models for fission track counts. *Math. Geol.*, 13, 471-488.
- 兼岡一郎 (1998) 年代測定学概論. 東京大学出版会, 315 p.
- Ludwig, K. (1999) Isoplot/EX. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Barkley, CA: Barkley Geochronological Center, Special publication 1a.
- Marsh, B. (1982) On the mechanism of igneous diapirism, stoping and zone melting. *Am. J. Sci.*, 282, 808-855.
- 松田高明 (1999) ジオメトリーガラス NIST-SRM612 と IRMM-540 の比較. *フィッション・トラック ニュースレター*, 12, 17-20.
- Matsuda, T., Sakiyama, T., Enami, R., Otofujii, Y., Sakhno, V.G., Matunin, A.P., Kulinch, R.G. and Zimin, P.S. (1998) Fission track ages and magnetic susceptibility of Cretaceous to paleogene volcanic rocks in southeastern Sikhote Alin, Far East Russia. *Resource Geol.*, 48, 285-290.
- Paces, J.B. and Miller, J.D. Jr. (1993) Precise U-Pb ages of Duluth Complex and related mafic intrusions, northern Minnesota: Geochronological insights to physical, petrogenetic, paleomagnetic and tectonomagmatic processes associated with the 1.1 Ga mid-continent rift system. *Jour. Geophys. Res.*, 98, 13997-14013.
- Sato, T., Terashima, S. and Ishihara, S. (1982) Abundance of tin in the Yakushima granitic complex, southern Japan. *Jour. Japanese Assoc. Min. Pet. Econ. Geol.*, 77, 94-99.
- Shibata K and Nozawa T (1968) K-Ar ages of Yakushima granite, Kyushu, Japan. *Bull Geol Surv Japan*, 19: 237-241.
- 通商産業省・資源エネルギー庁 (1992) 希少金属鉱物資源の賦存状況調査報告書. 171 p.
- Zeitler, P.K., Tahirkheli, A.K., Naeser, C.W. and Johnson, N.M. (1982) Unroofing history of a suture zone in the Himalaya of Pakistan by means of fission track annealing ages. *Earth Planet. Sci.*, 57, 227-240.

表1：京都大学原子炉黒鉛照射施設 (KUR-Tcpn) についての各標準試料の ξ 補正値

外部検出器法 (ED1) を用いた。4 π /2 π geometry correction factor: 0.5。

ジルコン標準試料についての χ^2 検定は生データが喪失したためFCT88ZR40-2, ZR39-2 についてのみ行われている。

表中の加重平均は松田が1997年12月時点で算出したもの。その後さらに補正値の向上が行われた。

本報告で用いた ξ 補正値は、Fish Canyon tuff (27.8 \pm 0.7 Ma)、Tardree Rhyolite (58.7 \pm 1.1 Ma)、

Buluk tuff (16.2 \pm 0.2 Ma)、Durango apatite (31.4 \pm 0.5 Ma) を用いて算出した ξ 値の加重平均を使用した。

ジルコンの ξ 補正値には 386.3 \pm 23.0 (Matsuda et al., 1998)、アパタイトの ξ 値には下記データの加重平均

300.6 \pm 8.8 を使用した。

ジルコン FT 年代と 補正値の算出根拠

Sample No.	No. of grains	Spontaneous tracks		Induced tracks		Dosimetry glass (SRM612)		r	χ^2	ξ	σ
		n	E6/cm2	n	E6/cm2	n	E5/cm2				
Fish Canyon Tuff											
FCT88ZR-38-2	19	6111	5.38	8333	7.33	6702	2.09	0.962		363.0	11.9
FCT92ZR-2	24	8616	4.59	5675	3.03	6122	0.953	0.989		385.7	12.8
FCT92ZR-2	16	6156	4.73	3934	3.02	6018	0.937	0.927		379.4	13.3
Fish Canyon Tuff									Weighted mean	375.6	7.1
FCT88ZR40-2	27	10511	4.97	9998	4.73	7112	1.34	0.994	14	395.7	12.4
FCT88ZR39-2	26	6556	5.01	6351	4.85	6906	1.37	0.918	0	393.7	13.0
Tardree Rhyolite											
TD-5-2	13	2934	6.57	2113	4.73	6702	2.13	0.983		398.5	15.1
Buluk Tuff											
BL-5-2	23	2209	0.939	5644	2.4	6702	2.11	0.948		395.3	11.1

アパタイト FT 年代と 補正値の算出根拠

Sample No.	No. of grains	Spontaneous tracks		Induced tracks		Dosimetry glass (SRM612)		r	χ^2	ξ	σ
		n	E5/cm2	n	E5/cm2	n	E5/cm2				
Fish Canyon Tuff											
Fct84/3-11	29	373	2.19	1231	7.23	2970	6.23	0.898	15	295.1	18.3
Fct88AP-11	20	565	2.29	1727	7.01	3261	6.84	0.887	70	249.1	13.0
Fct84/3-12	30	444	2.40	1370	7.42	3069	6.43	0.721	30	267.7	15.5
Fct88AP-12	26	475	2.01	1675	7.07	3163	6.63	0.840	50	295.4	16.2
Fct88AP-13	20	661	2.50	2771	10.5	4296	8.10	0.837	15	288.7	13.3
Fct88AP-14	34	847	1.92	3824	8.64	4204	7.85	0.852	50	315.2	12.9
Fish Canyon Tuff									Weighted mean	284.6	10.3
Fct88AP-20	39	768	0.216	4004	1.13	6862	9.46	0.883	87.7	308.1	14.9
FctAP-11-2	31	1037	0.195	5697	1.07	3330	9.15	0.606	5.1	334.1	15.3
Fct88AP/Ma141	38	565	0.195	3645	1.26	6789	11.01	0.786	59	327.0	17.4
Fct88AP/Ma150	36	641	0.199	3721	1.16	6575	10.4	0.629	11.9	312.3	16.0
Durango apatite											
Durango-11	24	1590	2.02	4939	6.26	3067	6.43	0.975	15	303.3	10.3
Durango-12	8	734	1.75	2579	6.14	3100	6.50	0.984	40	339.7	15.3
Durango-13	14	1860	1.78	7997	7.64	4296	7.99	0.994	2	338.1	10.1
Durango-15	19	1320	1.94	4082	6.01	3358	7.04	0.989	20	277.0	10.0
Durango-16	19	1700	1.91	5939	6.69	3164	6.70	0.982	10	329.0	10.9
Durango-17	17	2306	1.86	10122	8.16	4414	8.33	0.996	50	331.5	9.3
									Weighted mean	317.8	10.2

表2：熱中性子線量のモニターに使用された標準ガラスとトラック数および密度

NIST612 vs IRMM540

Irrad. no	Facility	Glass no	NIST612		IRMM540		540/612	
			(x E5/cm2)	n	(x E5/cm2)	n		
Ma-128	Tcnp	40m	HIT-109	1.37	3549	1.56	3244	1.14
			HIT-110	1.29	3357	1.56	3252	1.21
Ma-129	Tcnp	5h	HIT-105	9.46	3443	11.4	3547	1.21
			HIT-106	9.57	3486	11.4	3562	1.19
Ma-132	Tcnp	40m	HIT-109	1.54	3198	1.76	3206	1.14
			HIT-110	1.49	3101	1.75	3185	1.17
Ma-133	Tcnp	5h	HIT-101	10.8	3368	12.4	3213	1.15
			HIT-102	10.9	3394	12.2	3163	1.12

表3：フィッシュントラック年代測定結果

測定には外部検出器法 (ED1) を使用した。測定に供した粒子数、自発トラック数と密度、誘発トラック数と密度、標準ガラスのトラック数と密度、相関係数 (r)、 χ^2 検定値 (Galbraith, 1981)、年代および標準誤差を示す。

$4\pi/2\pi$ geometry correction factor: 0.5. ジルコン年代の補正値は 386.3 ± 23.0 (Matsuda et al., 1998)、アパタイトの補正値は 300.6 ± 8.8 である。標準ガラスは SRM612 を用いた。

Zircon

Sample No.	No. of grains	Spontaneous track		Induced track		Dosimetry glass		r	P(χ^2) %	Age (Ma)	2σ
		n	E6/cm2	n	E6/cm2	n	E5/cm2				
YMG01a	24	3539	3.78	6813	7.28	6906	1.36	0.977	0.01	13.6	0.6
YMG02a	31	6238	3.49	11322	6.33	6906	1.35	0.987	0.1	14.3	0.6
YMG03a	33	5096	2.82	9467	5.25	6906	1.34	0.993	5.7	13.9	0.6
YMG04a	34	6709	3.77	11157	6.57	6906	1.33	0.992	28.2	14.7	0.6
YMG05a	28	5778	3.77	10344	6.74	6906	1.33	0.993	14.7	14.3	0.6
YMG06a	29	5948	3.65	10762	6.60	6906	1.32	0.995	41.3	14.1	0.6
YMG07a	28	5552	3.71	10139	6.78	6906	1.31	0.993	28.8	13.8	0.6
YMG08a	27	5695	2.73	10149	4.87	6906	1.30	0.994	5.6	14.1	0.6
YMG09a	30	7411	4.04	13453	7.33	6906	1.29	0.993	16.2	13.7	0.5
YMG10a	23	4952	3.79	9254	7.07	6909	1.29	0.99	13.1	13.3	0.6
YMG11a	19	2672	3.44	5081	6.54	6299	1.54	0.986	1.3	15.6	0.8
YMG12a	27	5734	2.92	12092	6.15	6299	1.54	0.978	0	14.1	0.6
YMG13a	27	3841	3.67	8140	7.81	6299	1.53	0.988	10.5	13.9	0.6
YMG14a	27	4934	2.49	10071	5.09	6299	1.53	0.993	5	14.4	0.6
YMG15a	18	2564	2.86	5122	5.71	6299	1.52	0.987	25.4	14.7	0.8
YMG16a	28	4045	3.51	7809	6.78	6299	1.52	0.988	0.9	15.2	0.7
YMG17a	22	4326	3.30	9397	7.17	6299	1.51	0.994	33.3	13.4	0.6
YMG18a	36	6239	2.76	12821	5.67	6299	1.51	0.91	0	14.2	0.6
YMG19a	24	3813	3.63	7879	7.51	6299	1.50	0.991	22	14.0	0.6
YYG01a	35	5782	2.51	11438	4.96	6299	1.49	0.991	70.2	14.5	0.6
YMF01a	17	2088	2.95	4212	5.96	6599	1.49	0.992	7.2	14.2	0.8

Apatite

Sample No.	No. of grains	Spontaneous track		Induced track		Dosimetry glass		r	P(χ^2) %	T (Ma)	2σ
		n	E5/cm2	n	E6/cm2	n	E5/cm2				
YMG01a	33	237	1.48	3672	2.29	6926	9.46	0.888	16.2	9.2	1.3
YMG02a	46	416	1.40	6777	2.32	6926	9.46	0.744	8	8.7	0.9
YMG03a	34	502	1.15	7097	2.05	6926	9.47	0.877	50.2	10.1	1.0
YMG04a	29	368	1.17	5608	1.78	6926	9.48	0.927	95.2	9.4	1.0
YMG05a	45	536	1.02	8497	1.62	6926	9.48	0.851	98.8	9.0	0.8
YMG06a	45	692	1.22	10701	1.89	6926	9.49	0.829	81.3	9.2	0.8
YMG07a	41	457	1.23	7354	1.98	6926	9.50	0.92	47.5	8.9	0.9
YMG08a	47	569	1.08	9111	1.73	6926	9.50	0.922	100	8.9	0.8
YMG09a	45	518	1.17	8631	1.95	6926	9.51	0.938	12.6	8.6	0.8
YMG10a	23	169	1.95	2828	3.26	6926	9.51	0.898	49	8.6	1.4
YMG11a	20	220	1.55	3309	2.34	6762	10.8	0.976	81.7	10.8	1.5
YMG12a	35	227	1.98	3587	3.13	6762	10.8	0.546	79.8	10.3	1.4
YMG13a	42	346	1.69	5689	2.79	6762	10.8	0.827	52.8	9.9	1.1
YMG14a	30	196	1.13	3247	1.88	6762	10.8	0.48	19.2	9.8	1.5
YMG16a	45	578	0.92	10397	1.66	6762	10.8	0.847	47.6	9.0	0.8
YMG17a	50	344	1.51	6017	2.63	6762	10.9	0.698	31.9	9.4	1.1
YMG18a	44	336	1.34	5314	2.12	6762	10.9	0.9	34.5	10.4	1.2
YMG19a	13	74	1.38	1313	2.45	6762	10.9	0.804	34.1	9.2	2.2
YMF01a	43	456	2.06	9935	4.50	6762	10.9	0.826	11.2	7.5	0.7
YYG01a	13	268	5.88	3854	8.46	6762	10.9	0.956	45.4	11.4	1.5

表4：試料採取地点と標高・年代

表のデータが本文の議論と図 1,2 の作製に用いられた。

Sample no.	UTM 52th zone (1965)		Elevation m	Apatite age		Zircon age	
	Latitude	Longitude		Ma	2s	Ma	2s
YMG01	N30° 23.22'	E130° 29.39'	670	9.19	1.3	13.6	0.6
YMG02	N30° 18.54'	E130° 36.13'	680	8.74	0.9	14.3	0.6
YMG03	N30° 18.54'	E130° 36.12'	680	10.1	1	13.9	0.6
YMG04	N30° 17.22'	E130° 31.75'	1380	9.36	1	14.7	0.6
YMG05	N30° 20.00'	E130° 32.98'	900	9	0.8	14.3	0.6
YMG06	N30° 15.88'	E130° 29.49'	890	9.23	0.8	14.1	0.6
YMG07	N30° 25.06'	E130° 26.59'	40	8.88	0.9	13.8	0.6
YMG08	N30° 21.65'	E130° 23.23'	190	8.93	0.8	14.1	0.6
YMG09	N30° 17.27'	E130° 26.75'	460	8.59	0.8	13.7	0.5
YMG10	N30° 23.47'	E130° 34.50'	460	8.55	1.4	13.3	0.6
YMG11	N30° 19.96'	E130° 37.66'	260	10.8	1.5	15.6	0.8
YMG12	N30° 15.19'	E130° 35.08'	250	10.3	1.4	14.1	0.6
YMG13	N30° 24.32'	E130° 31.49'	160	9.88	1.1	13.9	0.6
YMG14	N30° 20.03'	E130° 27.13'	1040	9.81	1.5	14.4	0.6
YMG15	N30° 18.03'	E130° 28.73'	1150			14.7	0.8
YMG16	N30° 19.39'	E130° 30.98'	1880	9.03	0.8	15.2	0.7
YMG17	N30° 22.98'	E130° 32.49'	710	9.38	1.1	13.4	0.6
YMG18	N30° 26.47'	E130° 28.21'	90	10.4	1.2	14.2	0.6
YMG19	N30° 25.07'	E130° 29.46'	400	9.24	2.2	14	0.6
YMF01	N30° 17.15'	E130° 25.59'	150	7.53	0.7	14.5	0.6
YYG01	N30° 22.55'	E130° 30.47'	440	11.4	1.5	14.2	0.8

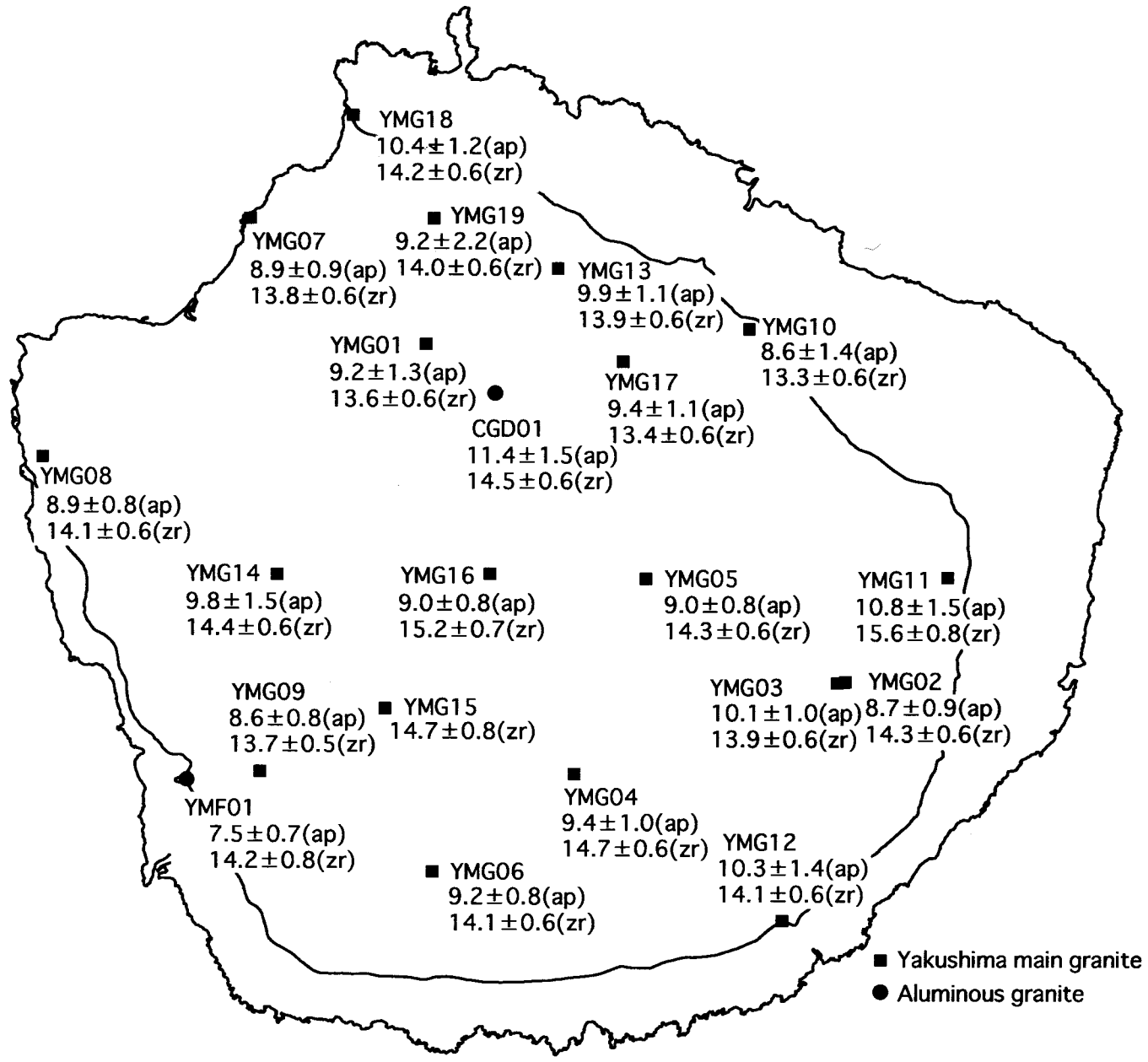


図1：屋久島花崗岩のフィッシュトラック (FT) 年代。主岩相 (YMG) から 19 試料、周縁部と岩体中心部に露出するのパーアルミナスな花崗岩から 2 試料 (YMF と CGD) を採取し、ジルコンとアパタイトを抽出した。FT 年代測定は松田が行った。(zr) はジルコン FT 年代、(ap) はアパタイト FT 年代を示す。YMG02 と YMG03 は内部境界面をはさんだ同一露頭から採取した。

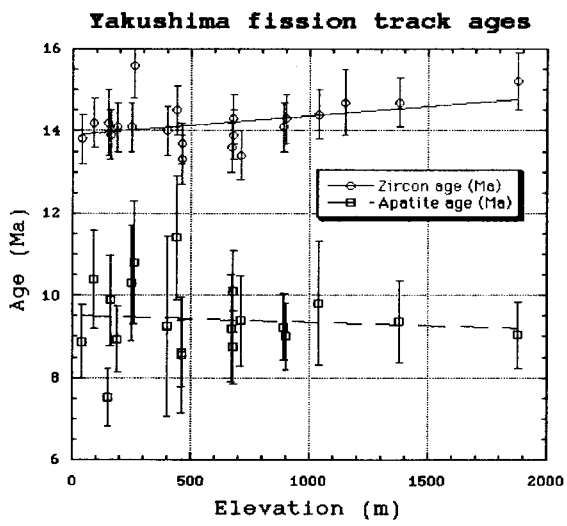


図2：ジルコン FT 年代は誤差の範囲でほとんど一致するものの、高度に対する弱い相関が見られた。ジルコン FT の閉鎖温度 (200 °C) に相当する等温面は最高峰の宮之浦岳から海岸線までほぼ 2000 m の高度差を、およそ 1 Ma かけて下降した。これは、1 年間に 2 mm の速さで隆起・削剥が生じたことに相当する。アパタイト FT 年代は年代値のばらつきも誤差も大きい、誤差の範囲でほとんど一致する。ジルコン FT 年代の平均値は 14.2 Ma、アパタイト FT 年代の平均値は 9.4 Ma である。アパタイトの閉鎖温度 (100 °C) にいたる 100 °C の冷却に、およそ 4.8 Ma を要した。

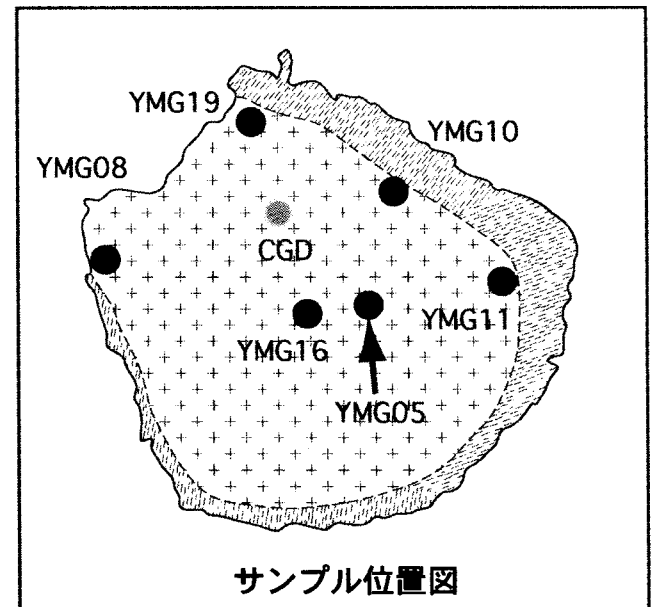
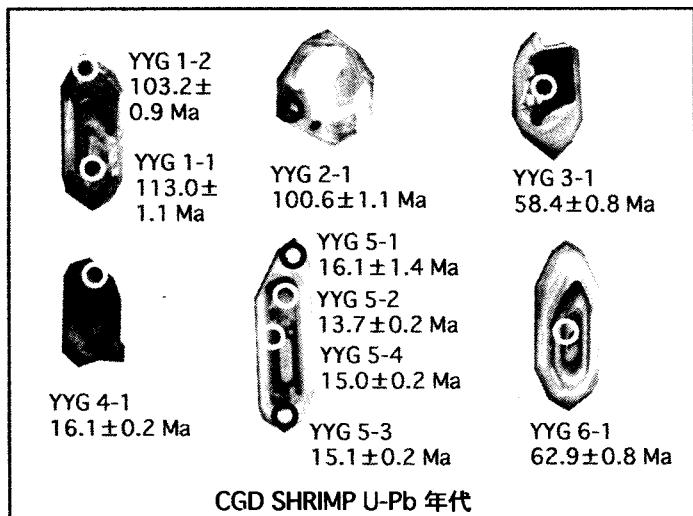
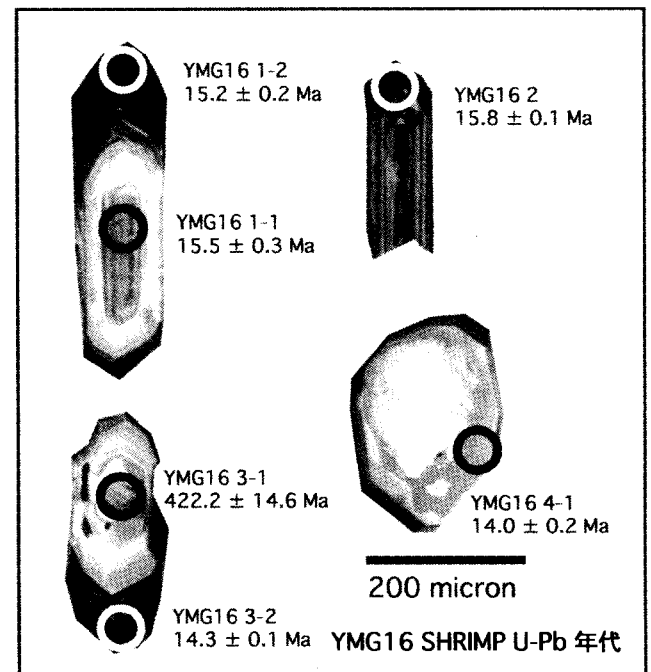
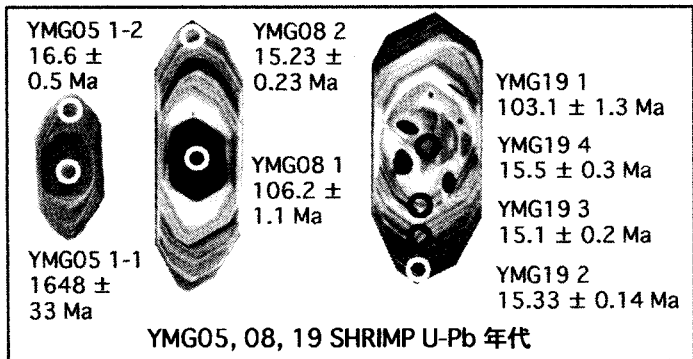
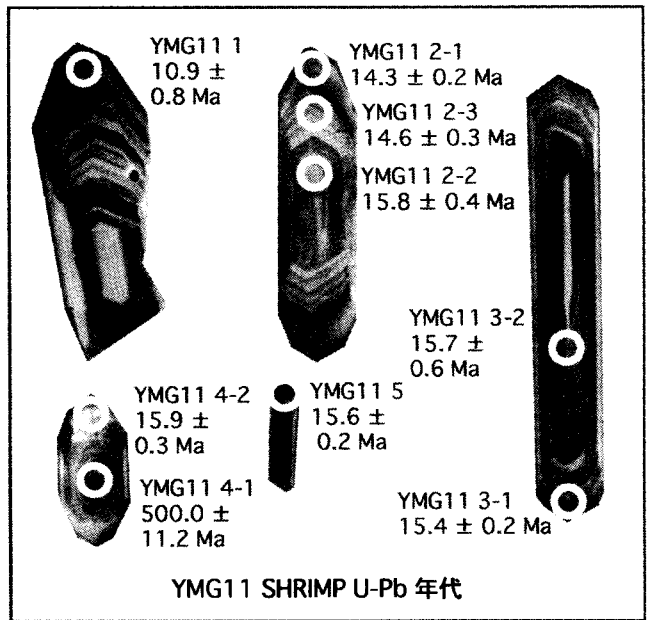
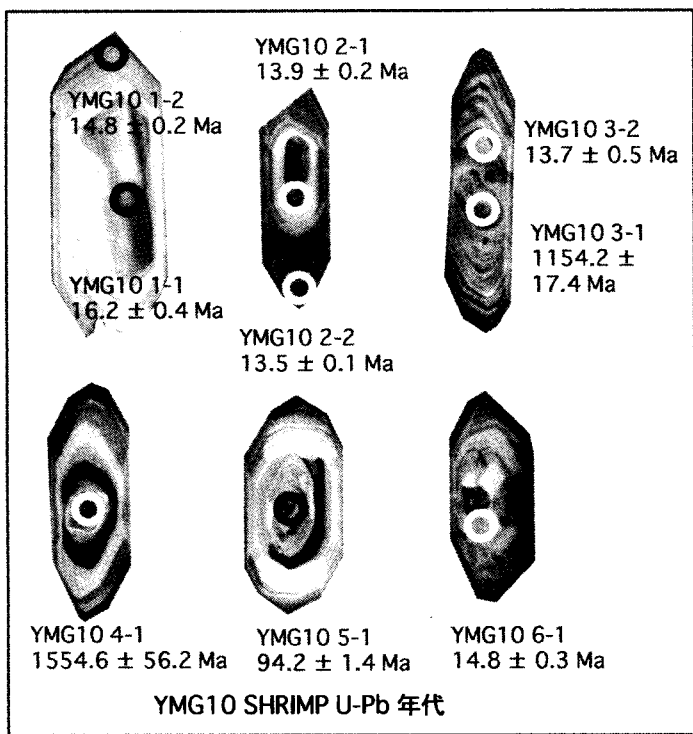


図3：屋久島花崗岩類に含まれるジルコン結晶のCL画像とSHRIMP年代。写真のスケールはすべてYMG16のものと同じでスケールバーの長さは200ミクロン。丸で示した点を測定した。さまざまな年代を示す核のまわりに中期中新世のovergrowthが見られる。測定に供したジルコン結晶は、右のサンプル位置図に示した試料から抽出された。

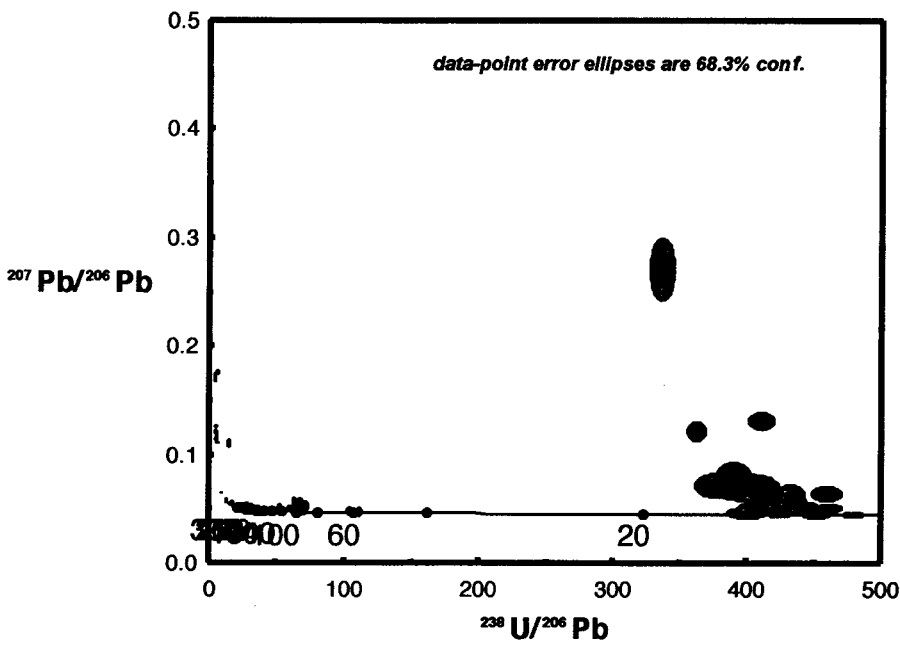


図4：屋久島花崗岩類に含まれるジルコンのウラン鉛データの Tera-Wasserburg コンコーディアプロット。中新世代を示すものは、一部 common lead の影響が認められるが、多くの場合コンコーディアにのる。誤差も小さく、ジルコン晶出年代が正確に測定されている。

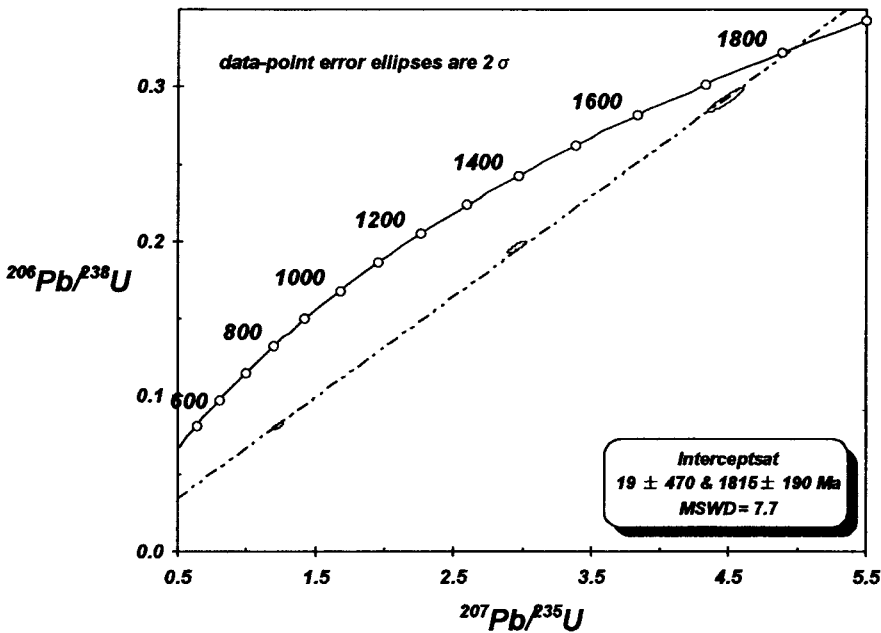


図5：屋久島花崗岩類に含まれるリサイクルされたジルコン結晶中心部のウラン鉛データのコンコーディアプロット。一本のディスコーディアにのりそうなデータを抽出してプロットした。安間・Armstrong（本報告）に見られるように、母岩の四万十帯堆積物中には太古代や原生代の年代を示すジルコンがごく普通に含まれている。この図は花崗岩の起源（あるいは汚染）物質に含まれていた原生代のジルコンが、中新世の火成作用によって変成を受け、ディスコーディアにのるようになったことを示唆する。各データの誤差を楕円の大きさ（ 2σ ）で表している。

Radiometric ages for Yakushima granites

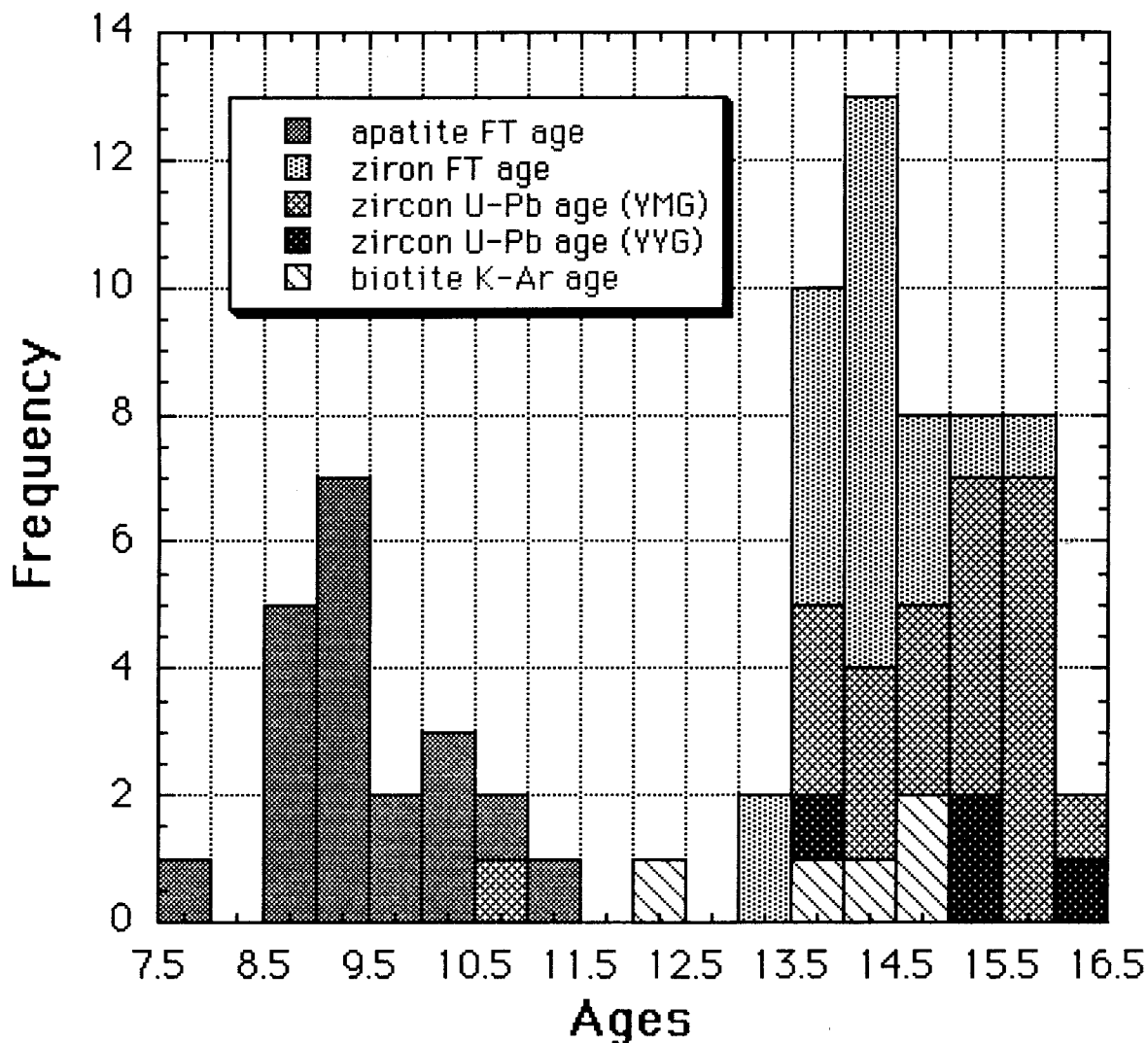


図6：中新世放射年代の頻度分布。ウラン鉛年代はもっとも古い中央値をもつ（平均値 14.8 Ma, n = 27）が、アパタイトの FT年代（平均値 9.4 Ma, n = 20）と重なるものも見られた。ジルコンの FT年代（平均値 14.2 Ma, n = 21）は黒雲母 K-Ar 年代（平均値 13.9 Ma, n = 5）よりわずかに古く算出される傾向にあった。