フィッション・トラック　ニュースレター　第22号　1-10　2009年

論説

ペルー共和国パルカ鉱山の鉱化関連火成岩のフィッション・トラック年代

大平寛人*・山中　慧*・吉村洋平**・橋本守男***・山中和彦****・五味　篤*****

Fission track ages of igneous rocks associated with ore mineralization of the Pallca Mine, Republic of Peru.

Hiroto Ohira*, Satoshi Yamanaka*, Yohei Yoshimura**, Morio Hashimoto***, Kazuhiko Yamanaka****, and Atsushi Gomi*****.

*　島根大学総合理工学部地球資源環境学科　Department of Geoscience, Shimane University.
**　サンタルイサ鉱業株式会社　Minera Santa Luisa Co., Ltd.
***　三井金属資源開発株式会社　Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd.
**** 三井金属鉱業株式会社ペルー支社　Sucurasal del Peru, Mistui Mining and Smelting Co., Ltd.
*****三井金属鉱業株式会社　Mistui Mining and Smelting Co., Ltd.

Abstract

Zircon fission track ages were measured on samples from the Culebra igneous complex and associated quartz porphyries (rhyolitic) near the Pallca mine. The main rock facies of the Culebra complex yield FT ages of 13.6～14.2Ma, compatible with previously reported K-Ar ages. Quartz porphyries which are closely associated with Zn-Pb skarn mineralization based on geological relations but have not been dated before give ages of 13.3～14.2Ma. These ages are concordant with the mode of ages from contiguous intrusions in the middle part of Peru which contain currently producing mines (including Cerro de Pasco and Iskaycruz). Average U contents and crystal shapes of zircon from two Pallca quartz porphyries differ from the Culebra main facies. Zircon characteristics also differ between the two quartz porphyries. Zircons from the quartz porphyry nearest the Culebra ore district (QP-1-2) lack pyramidal faces and have extremely high U contents (>1400ppm).These features are probably due to derivation from magmas with different characteristics. Quartz porphyry near the Berlin ore district contains prismatic and rounded zircons. The former are of igneous origin, and the latter are of sedimentary origin, being captured from the surrounding basement during intrusion. The ages of the rounded zircons are almost the same as the prismatic zircons due to complete reset of the fission track system.

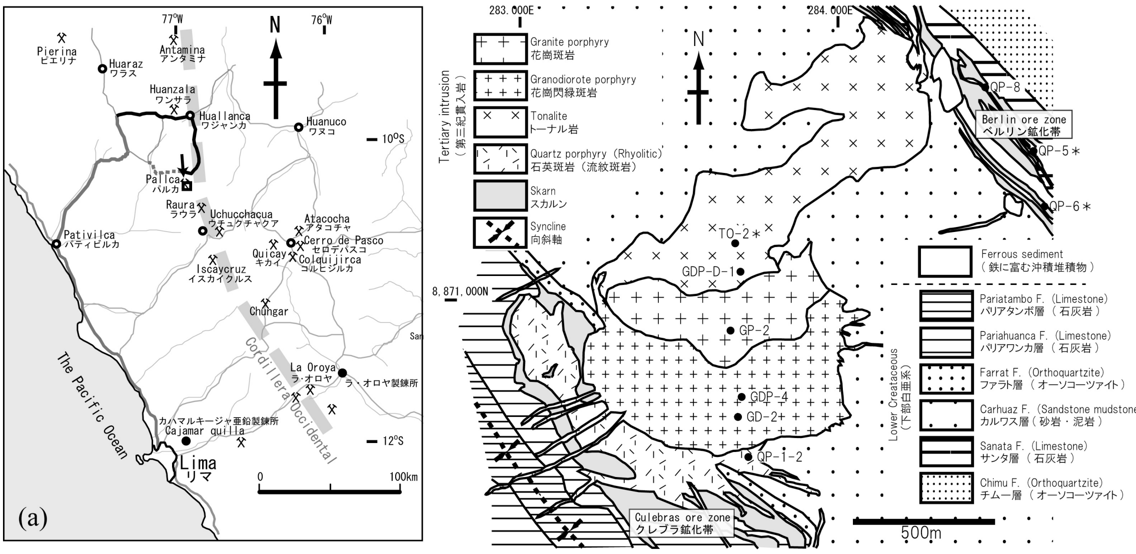
Key words: Peru, Pallca, Pallca Mine, Culebra complex, fission track, age, zircon.

1.はじめに

ペルー共和国は鉛，亜鉛，銀などを産する鉱業国であり，金属資源を海外に依存する日本にとって重要な役割を果たしている(五味ほか，1998)．パルカ鉱山はペルー共和国中北部に位置する亜鉛鉱山で，白亜紀石灰岩層への中新世花崗岩類の貫入により形成されたPb-Zn型のスカルン鉱床であり，金属鉱業事業団と三井金属鉱業(株)による広域調査（1994年～2000年）を経て2006年3月に操業を開始した．

パルカ鉱山の鉱化関連花崗岩類（クレブラ複合岩体）はトーナル岩，花崗閃緑斑岩，花崗斑岩からなり石英斑岩を伴う．放射年代は概ね中期中新世（12.6～16.6Ma）を示し（金属鉱業事業団，1998，2001；五味ほか，1998），いくつかのK-Ar年代は野外で観察される前後関係，逆入順序と調和的であることが示されている（金属鉱業事業団，2001）．

今回，ジルコンのフィッション・トラック年代測定を行い，クレブラ複合岩体および石英斑岩



第1図　ペルー共和国パルカ鉱山位置図(a)および鉱山周辺の地質図と試料採取地点(b)（＊:ジルコンを抽出できない試料）

Fig. 1　Location map of the Pallca mine (a), regional geological map and sampling sites (b)（＊: Samples with scarce zircons）

の年代を検討した．特に石英斑岩については，地質図上の分布からスカルン化変質との密接な関連が示唆されているが（金属鉱業事業団，2001），これまで直接的な放射年代は得られておらず，本論ではじめて報告するものである．

フィッション・トラック法はジルコンなどの鉱物中の^{238}Uの核分裂飛跡を計数して年代を求める方法である．一般に，放射年代測定法には手法固有の閉鎖温度が存在し，得られた年代は試料が閉鎖温度以下に冷却した時代と解釈される．ジルコン中のフィッション・トラックの閉鎖温度（210～260℃；Brandon and Vance, 1992）は黒雲母K-Ar年代の閉鎖温度（約300℃）に比較するとやや低温であるが，ジルコンの特性から化学的変質が年代値に与える影響はきわめて小さく，また比較的急冷した岩体の活動時代の解明にも適用できるというメリットがある．

2．地質概要

パルカ鉱山はペルー共和国，首都リマから北方約210km，アンデス山脈（オクシデンタル山脈）の中軸部に位置するアンカッシュ県ボログネシ郡パクジョン(Departamento de Ancash, Provincia de Bolognesi, Distrito de Pacllon)に位置する(第1図(a))．鉛・亜鉛鉱山として1968年より操業するワンサラ(Huanzala)鉱山の南約40kmに位置し，同鉱山を核とするワンサラ・マイニング・コンプレックス（HMC）構想に基づいて2006年より操業が開始された（藤井ほか，2007）．この地域は標高3,550mから最高地点のクレブラミナ岳(Cerro Culebramina；標高5,122m)まで起伏に富む急峻な地形である(五味ほか,1998)．

本地域は主に白亜紀下部～中部の堆積岩類（石灰岩を含む）及びこれらに貫入する第三紀貫入岩類からなる（第1図(b)）．白亜紀後期から第三紀中期にかけて生じた著しい褶曲作用を被り，東部にパルカ背斜，西部にクレブラス向斜が存在する（五味ほか，1998）．

堆積岩類は全て整合で下位から薄い頁岩層を挟むオーソコーツァイト質珪岩からなるチムー層，石灰岩からなるサンタ層，頁岩と砂岩の互層で構成されているカルワス層，主にオーソコーツァイト質珪岩で構成されている薄いファラト層，石灰岩からなるパリアワンカ層および石灰岩と頁岩互層からなるパリアタンボ層からなる（五味ほか，1998；金属鉱業事業団，2001）．

これらの堆積岩類に貫入する火成岩類はトーナル岩，花崗斑岩，花崗閃緑斑岩および石英斑岩からなる1000m×1500mの複合深成岩体（クレブラ複合岩体）であり，このうち石英斑岩は南西部分に1000m×250mの半月状岩株として分布する（金属鉱業事業団，2001）．この複合岩体は，スカルン鉱化帯の鉱物組み合わせなどから推定された鉱床生成温度の分布傾向からその存在が推定され，地表踏査を経て発見された経緯

がある（五味ほか，1998）．

金属鉱業事業団（2001）によれば，全岩化学組成に基づく岩石化学的特徴は，石英斑岩がアルカリ岩系であるのに対し，それ以外の岩相はサブアルカリ岩系に属すことから，両者のマグマは本質的に異なっていたとされる．また石英斑岩が花崗閃緑斑岩に切られ，かつセリサイト化変質が著しいことから，石英斑岩がクレブラ複合岩体の主要な岩相に先立って活動した可能性がある．クレブラ岩体の主要岩相については花崗閃緑斑岩がトーナル岩を切るように，また花崗斑岩がトーナル岩や花崗閃緑斑岩を切るように分布することから，活動の順序はトーナル岩，花崗閃緑斑岩，花崗斑岩の順である可能性が高いとされる．黒雲母や長石類のK-Ar年代の中央値はこの逆入順序と調和的な結果を示し，微量元素組成の特徴（Nb-Zrプロット）も上述の前後関係と調和的にマグマの分化が進行したことを示す（金属鉱業事業団，2001）．

パルカ鉱山の鉱化帯はサンタ層，カルワス層の一部およびパリアワンカ層の石灰岩を交代した鉛・亜鉛スカルン鉱床で，西部のクレブラ鉱化帯（パリアワンカ層の石灰岩を交代）と東部のベルリン鉱化帯（サンタ層石灰岩を交代）に区分される．スカルン変質帯の規模は，西部のクレブラ鉱化帯では最大幅200mで延長2500m，ベルリン鉱化帯では幅40～60m延長2000mに達するとされる．鉱石鉱物は方鉛鉱，閃亜鉛鉱，黄銅鉱，黄鉄鉱，磁硫鉄鉱などであり，鉛・亜鉛鉱化部はスカルン変質帯中にレンズ状に胚胎する（金属鉱業事業団，2001）．

鉱化作用との関連については，クレブラ鉱化帯における石英斑岩とスカルン変質帯の分布範囲が調和的であること（第1図(b)）から，石英斑岩がスカルン化変質に寄与した可能性が高い（金属鉱業事業団，2001）．一方，花崗閃緑斑岩を中心にMo鉱化帯が認められることや，主要Znスカルンの鉱化関連火成岩の化学組成の平均値との比較検討から，花崗閃緑斑岩も鉱化作用に関連したとされる（五味ほか，1998；金属鉱業事業団，2001）．

3. 既報の放射年代

3-1パルカ鉱山および周辺鉱床

石英斑岩を除くクレブラ複合岩体の各岩相についての放射年代が測定されている．花崗閃緑斑岩の黒雲母K-Ar年代は16.6±0.2Maである（金属鉱業事業団，1998；五味ほか，1998）．三井金属鉱業社内資料によれば測定はAmdel mineral servicesが行い黒雲母のK量は3.7％と通常（6-8%）よりも低く角閃石の混入を示唆するとされる．このK-Ar年代によってパルカ鉱山の鉱化関連火成岩の活動時代が中期中新世であることが明らかとなった．この年代は同鉱山の北約40kmのワンサラ鉱山のK-A年代（7.7～9.2Ma），パルカ南方のラウラ（Raura）鉛・亜鉛スカルン鉱床やワンサラ北東のアンタミナ（Antamina）銅・亜鉛スカルン鉱床の年代（約10Ma）に比較して古く，パルカ周辺のスカルン鉱床（第1図(a)）の鉱化関連火成岩が必ずしも同時期に活動したものではないことが明らかとなった（金属鉱業事業団，1998）．

その後報告されたK-Ar年代はトーナル岩（13.7±0.4Ma），花崗閃緑斑岩（13.6±0.4Ma），花崗斑岩（12.6±0.4Ma）の順に年代中央値が若くなり，野外で観察される前後関係と調和的な結果を示す（金属鉱業事業団，2001）．三井金属鉱業㈱社内資料によればこれらの分析はクイーンズランド大学によるものでトーナル岩は黒雲母を，花崗閃緑斑岩と花崗斑岩は長石類（feldspar）を測定対象としている．なお，坑口から95m地点の輝水鉛鉱からRe-Os年代（15.03±0.05Ma）が得られている。測定された輝水鉛鉱は石英斑岩を切っており石英斑岩の活動と同時期かそれ以降の熱水活動により形成されたものと考えられる（金属鉱業事業団, 2003）．

3-2火成活動の広域的な時代変遷

Noble and Mckee（1999）はペルー北部地域の広域的な鉱化関連火成活動をK-Ar年代データに基づきMichiquillay El Toro（18～20Ma), Quirvilca-Pierina（13～15Ma）およびLate Miocene（7～10Ma)の3つのsub-beltに区分した．パルカ近傍のワンサラ鉱山（7.7～9.2Ma）やラウラ（Raura）鉛・亜鉛スカルン鉱床およびアンタミナ（Antamina）銅・亜鉛スカルン鉱床（約10Ma）もこれらの中新世中期～後期の火成活動に対比される．

一方本研究地域よりも南部（Cerro de Pasco～Huancayo地域）の多金属鉱床群の鉱化関連火成岩のAr-Ar年代（Bissig et al., 2008）によれば，ペルー中央部の鉱化作用は始新世後期（40Ma以降）に開始し，オクシデンタル山脈に交差する東西方向の時空的変遷を繰り返した後，中新世後期（5Ma頃）まで続いたとされる．そのうち最も大規模な火成活動は，17～12.5Maにオクシデンタル山脈中軸部の狭い範囲

に生じ，ペルー中央部の主要鉱床群もこの時期に形成したとされる（第1図(a)）．また火成活動の時空変遷の要因は,ナスカプレートの南アメリカ大陸への沈み込み様式の変化，特にプレートの沈み込み角度や収れん速度と関連があり，海嶺の沈み込みも火成活動に大きな影響を与えたとされる（Bissig et al., 2008). 個々の鉱床の年代については，漸新世以前のものはAtacocha（29.3Ma）やQuicay（37.5Ma）などわずかであるが，中新世中期（約15Ma）以降の火成活動は連続的であり13-15Maと5-7Maにモードがある（Bissig et al., 2008）．例えば第1図(a)のIscaycruzの鉱床北端部近傍のデイサイトポーフィリーから13.49±0.30Ma，Colquijirca西方のデイサイトポーフィリーから14.13±0.24Ma,歴史的鉱床であるChungerの亜鉛スカルンに関連する花崗閃緑岩から14.6±0.5Maが得られている（いずれもAr-Arプラトー年代；Bissig et al., 2008）．またCerro de PascoのYanamate花崗閃緑岩が15.2±0.4Ma（全岩K-Ar年代；Soler and Bonhomme, 1988a），Cerro de Pascoのデイサイトダイアトリームドームが15.4〜15.16Ma （ジルコンU-Pb年代；Baumgartner, 2007）で，同岩についてはやや若い14.5Ma（K-Ar年代；Silberman and Noble, 1977）も報告されている．パルカの南東約60kmのUchcchacuaについては時代の異なる鉱化作用を重複して被った可能性があり，近傍の火成岩から24.49Maおよび25.28Ma（黒雲母Ar-Arプラトー年代),13.63Ma（U-Pbジルコン年代），7.98Ma（黒雲母Ar-Arプラトー年代）の幅広い年代が得られている（いずれもBissig et al.,2008）．

4. 試料及びジルコンの特徴

ベルリン鉱化帯の坑道内試料を含む計13試料が採取されたが，フィッション・トラック年代測定に適したジルコンを抽出できたのはクレブラ複合岩体から4試料と石英斑岩2試料である（第1図(b)）．トーナル岩およびベルリン鉱化帯に産するいくつかの石英斑岩からはジルコンを抽出することができなかった．以下にジルコンが抽出された試料の概要を野外で推定される活動順に述べる．なお花崗閃緑斑岩は産状が岩脈状のものを除いて，等粒状に近い試料（Ⅰ型）と基質と斑晶の区分が明瞭な試料（Ⅱ型）に区分して採取された．

［QP-1-2］石英斑岩（流紋岩質）（クレブラ鉱化帯近傍）

細粒緻密で，明灰白色を呈し，幅0.5mmの褐色脈や幅約3mmの石英脈（黄鉄鉱を伴う）を部分的に伴う．後述するクレブラ複合岩体の主要岩相と組織が全く異なり流紋岩に見える．斑晶として最大1mmの他形石英を少量含む．石基は極めて微細かつ粒状の珪長質鉱物からなりバリオール（variole）が集合しているようにも見えるが細かすぎて判然としない．石基のセリサイト化が不均質に進行している．この試料にはカルワス層の砂岩・泥岩と思われる0.5〜5mmの円形の堆積岩片を含む（第2図）．

ジルコン含有量は極めて少なく，淡肌色を呈する短柱状〜柱状のジルコンで柱面は確認できるが錘面が確認できない結晶が多い．錘面を有するジルコンの錐の角度から柱面は{110}型と判断される．ジルコン含有量，色調，結晶形態ともに他の試料とは全く異なる．

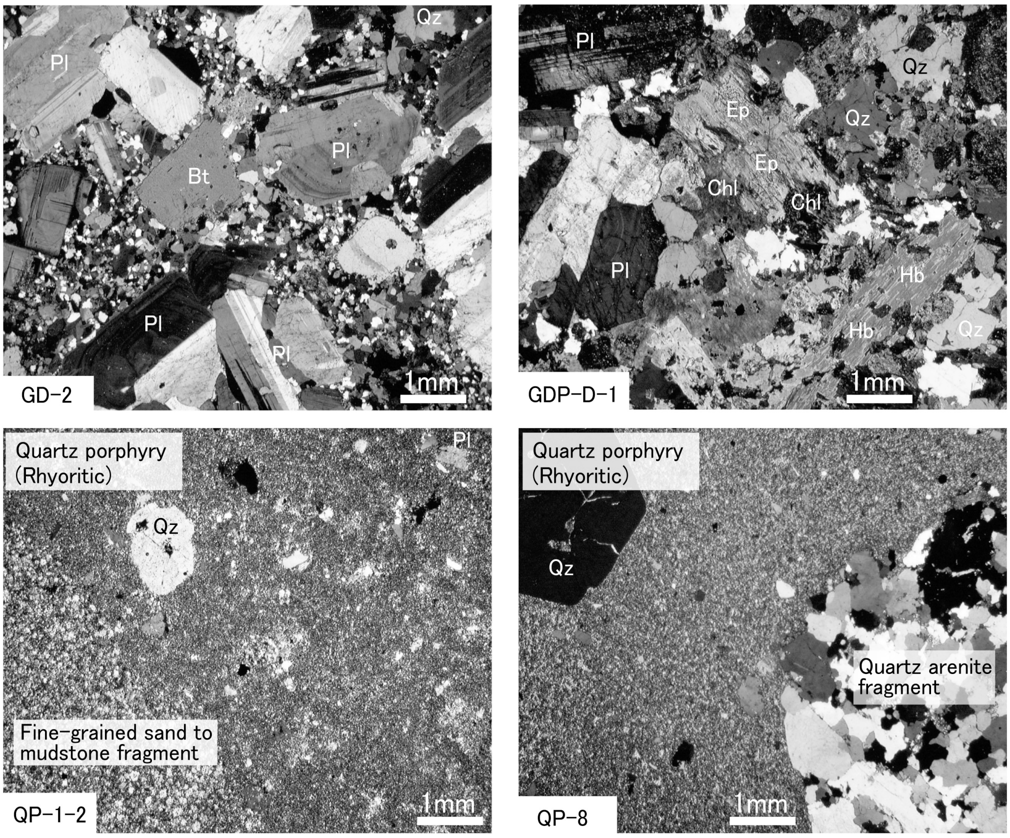
［QP-8］石英斑岩岩脈（流紋岩質）（ベルリン鉱化帯近傍）

細粒緻密で淡緑灰色を呈し，［QP-1-2］と同様に流紋岩に見える．斑晶量は5〜10％であり，石英斑晶（最大4mm）は自形〜他形で小さいものは破片状である．最大1mmの半自形斜長石も斑晶としてわずかに含む．石基はバリオール（variole）様の消光を示す細粒の珪長質物質からなり，一部石英や長石も確認できる．全体に石基のセリサイト化が進行し，微細格子状のセリサイトが発達している．この試料には最大8mmの円形の石英アレナイト質砂岩が捕獲されており，砂岩の石英粒子サイズは約0.5mmで粒間に白雲母薄層を含む（第2図）．この砂岩はカルワス層の砂岩が捕獲されたものと考えられる．

ジルコン含有量は少なく，50〜100μmの淡紅色〜やや透明の円磨されたジルコンが多い．わずかに含まれる自形ジルコンは柱状で{110}/{100}中間型であり，淡紅色〜淡肌色である．

［GDP-D-1］花崗閃緑斑岩岩脈（クレブラ複合岩体）

トーナル岩の分布範囲にあり，トーナル岩を切って分布する花崗閃緑斑岩岩脈である．基質は暗灰色で，長径約5mmの白色自形斜長石斑晶が認められる．鏡下では斑晶と基質の区分が明瞭ではなく等粒状に漸移する部分もある．斜長石，石英，角閃石，黒雲母からなり角閃石は一部緑れん石および緑泥石へ，黒雲母は緑泥石に変質している．



第2図　典型的な薄片(クロスニコル). GD-2：花崗閃緑斑岩, GDP-D-1：トーナル岩を貫く花崗閃緑斑岩脈, QP-1-2：クレブラ鉱化帯近傍の石英斑岩（流紋岩様で細粒砂岩を含む）, QP-8：ベルリン鉱化帯近傍の石英斑岩（流紋岩様で石英アレナイトを含む）. Qz: 石英, Pl: 斜長石, Bt: 黒雲母, Hb: 角閃石, Ep: 緑れん石, Chl: 緑泥石

Fig. 2 Representative thin sections (crossed nicols), GD-2: granodiorite porphyry, GDP-D-1: granodiorite porphyry dyke intruding tonalite, QP-1-2: quartz porphyry near the Culebras ore zone (including fine grained sedimentary rock), QP-8: Quartz porphyry (including quartz arenite), Qz: quartz, Pl: plagioclase, Bt: biotite, Hb: hornblende, Ep: epidote, Chl: chlorite

含まれるジルコンは淡紅色で100〜250μmの柱状〜長柱状の自形結晶で柱面は{110}/{100}中間型〜{110}やや優勢である.

［GDP-4］花崗閃緑斑岩(II型)（クレブラ複合岩体）

基質は暗灰色で長径約5mmの自形〜半自形の斜長石斑晶が顕著である. ［GDP-D-1］に比較して基質の色調が黒味がかっている. 鏡下では斑晶と基質部が漸移する部分もあり, 斑晶と基質の斜長石は変質のため濁って見える. 基質は針状または矩形の角閃石, 黒雲母, 斜長石, 石英からなる. 黒雲母のほとんどは緑泥石に変質しているが, 角閃石は比較的新鮮で一部が緑泥石に変化しているのみである.

非磁性重鉱物（比重3.29以上）の約80％はチタナイトで, 他形の黄鉄鉱が約10％である. ジルコンは淡紅色を呈し柱状から長柱状で, 柱面は{110}/{100}中間型〜{110}やや優勢でありサイズは100μm以下のものが多い.

［GD-2］花崗閃緑斑岩(I型)（クレブラ複合岩体）

肉眼では等粒状に近い花崗閃緑岩で長径約1cmの柱状斜長石および角閃石が認められる. 鏡下では斑状組織であるが基質は少なく, 約80％が斑晶からなる（第2図）. 斑晶は自形〜半自形斜長石, 他形石英および黒雲母で, 少量含まれる角閃石のサイズは小さい. 斜長石の累帯構造が顕著であり, 黒雲母の一部がわずかに緑泥石化している. 基質部は石英, 斜長石, 黒雲母および角閃石からなり石英が約半分を占める. 他の試料に比較してほとんど変質していない.

非磁性重鉱物（比重3.29以上）の60〜70％は黄鉄鉱で, チタナイトは約30％である. ジルコンは淡紅色を呈し, 100〜250μmの柱状〜長柱状の自形結晶で, 柱面は{110}/{100}中間型〜{110}やや優勢である.

［GP-2］花崗斑岩（クレブラ複合岩体）
基質は明灰肌色で最大5mmの白色半自形の斜長石斑晶が認められる．鏡下では斑晶は斜長石および他形石英であり，基質部は長石類，石英および変質した黒雲母からなる．斑晶の斜長石は変質のため濁っており一部緑れん石，方解石に置換している．黒雲母の多くはセリサイトおよび方解石に置換している．

分離された非磁性重鉱物（比重3.29以上）の約90％はチタナイトであり，内部に微細な灰黒色の金属鉱物を包有する石英や長石粒子も非磁性重鉱物として回収される．ジルコンは淡紅色で100〜150μmの柱状〜長柱状自形結晶で柱面は{110}/{100}中間型〜{110}やや優勢である．

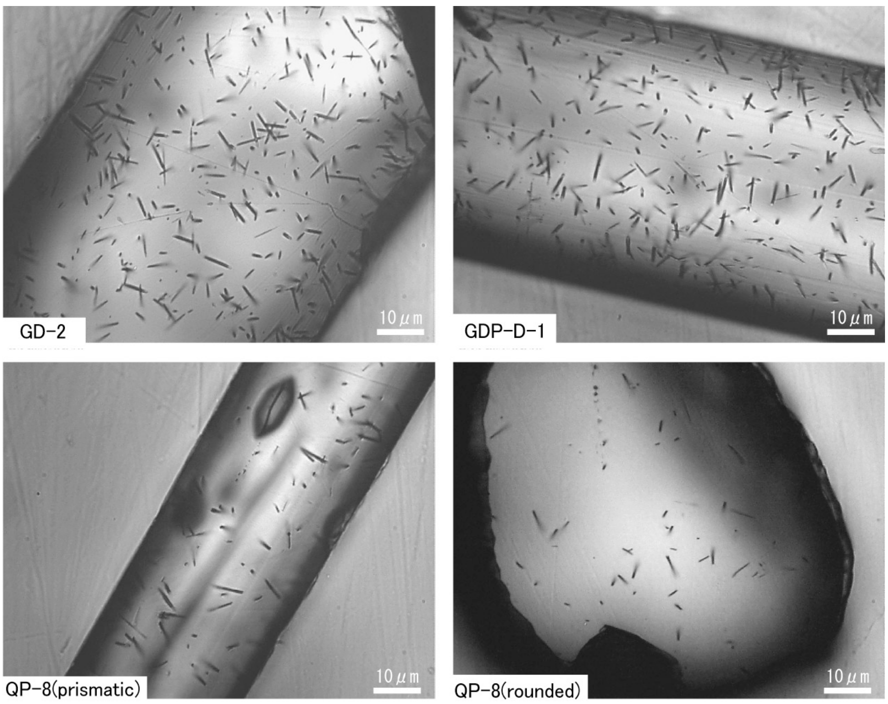
5．フィッション・トラック年代測定

結晶内部面を用いた外部ディテクター法により実験を行った．実験手順は大平・永井（2004）および大平（2004）に従い，結晶が清浄で包有物の少ないジルコンを対象とした．なお石英斑岩QP-8については柱面を有するジルコン（prismatic）と円磨されたジルコン（rounded）に分けて実験を行った．

エッチング時間はKOH-NaOH共融体（225℃）（Gleadow et al. 1976）で，26時間（QP-1-2），34時間（QP-8（2試料），GP-2，GDP-4）および43時間（GDP-D-1，GD-2）である．中性子照射は日本原子力研究開発機構（JAEA）原子力科学研究所JRR-3の気送管で20秒間行った。試料および線量ガラスに貼り付けてあった白雲母を46％HF（恒温槽25℃）で6〜8分および50分間エッチングし，ジルコン表面が清浄で自発FTが明瞭な粒子を計測し年代を求めた（第3図）．年代値の計算にはTrackkey（Dunkl，2002）を用いた．

なお今回使用した原子炉JRR-3気送管（カドミ比23）のゼータ値を現時点では得ていないためJRR-4の値を使用した．これまでの測定者固有のゼータ値は京都大学原子炉実験所（KUR）の黒鉛設備圧気輸送管（カドミ比200＜）で367.1±4.1（大平，2004），日本原子力研究開発機構（JAEA）原子力科学研究所のJRR-4（カドミ比3.6）では377.9±5.1（第1表）である．標準試料の違いはあるもののカドミ比が大きく異なる両原子炉のゼータ値の差異は3％程度であり，今回は中性子特性がJRR-3により近いJRR-4のゼータ値を採用した．

エッチング後の典型的なジルコンを第3図に，年代測定結果を第2表に示した．石英斑岩を除くジルコンの自発FT密度は3〜4×10^6/cm^2と計測に



第3図　典型的なジルコンのフィッション・トラック（GD-2，GDP-D-1，QP-8），クレブラ鉱化帯近傍の石英斑岩（QP-8）に含まれる長柱状自形ジルコン（prismatic）と円磨されたジルコン（rounded）．
Fig. 3 Fission tracks of representative zircon crystals (GD-2, GDP-D-1, and QP-8), Quartz porphyry near the Culebras ore zone（QP-8）contains prismatic euhedral zircon and rounded zircon.

第1表　年代標準試料に対して求められたゼータ値（JRR-4）
Table 1 Zeta calibration data for representative age standards (JRR-4)

Sample Name	No. crys.	ρs (Ns) (×106/cm2)	ρi (Ni) (×106/cm2)	P(χ^2) %	ρd (Nd) (×105/cm2)	r	Zeta (±1σ)
0612-1FCT3	30	4.099(2.813)	2.813(1876)	56.9	1.025(4740)	0.86	374.4±14.2
0612-15FCT2	27	5.384(2708)	3.618(1820)	30.4	1.025(4742)	0.89	366.4±14.0
0612-16FCT1	30	4.700(2806)	3.389(2023)	31.6	1.025(4742)	0.87	393.1±14.6
0701-1BMT	35	1.02(1121)	1.283(1410)	97.0	1.061(4905)	0.79	389.3±17.2
0701-1BMT2	30	1.079(905)	1.256(1054)	81.4	1.061(4905)	0.70	360.1±17.7
0701-2FCT	30	5.435(3163)	3.849(2240)	26.3	1.061(4905)	0.9	373.3±13.4
0701-11BMT2	26	1.245(1133)	1.377(1377)	98.1	1.061(4956)	0.82	375.8±16.6
0701-11BMT	30	1.112(1164)	1.395(1460)	82.3	1.061(4905)	0.6	388.3±16.9
0706-5FCT	20	5.303(2015)	4.534(1723)	36.9	1.266(5853)	0.94	377.7±15.1
					Weighted mean zeta=		**377.9±5.1**

Independent ages used are: FCT (Fish Canyon Tuff)=27.8±0.7Ma and BMT (Buluk Member Tuff)=16.2±0.2Ma (Hurford and Green, 1983; Hurford and Watkins, 1987). Analysis was done by external detecter methods and NIST-SRM612 glass was used for dosimeter monitor. Samples were irradiated at the pneumatic tube of the JRR-4 reactor of Japan Atomic Energy Agency (JAEA). ρ=track density; N=total number of tracks counted; s for spontaneous, i for induced and d for dosimeter; P(χ^2)=probability of obtaining χ^2 value for v degrees of freedom (where v=No.crystals-1) (Galbraith, 1981); r is the correlation coefficient between ρs and ρi.

第2表　ジルコンのフィッション・トラック年代測定結果
Table 2 Fission track analytical data for zircon.

Sample Name	No. crys.	ρs (Ns) ($\times10^6$/cm^2)	ρi (Ni) ($\times10^6$/cm^2)	P(χ^2) %	ρd (Nd) ($\times10^5$/cm^2)	r	U ppm	Age(Ma) (±1σ)
GP-2	32	3.319(3495)	5.251(5529)	9.1	1.163(4608)	0.84	573	**13.9±0.4**
GD-2	30	3.477(4019)	5.423(6269)	1.2	1.164(4614)	0.70	586	**14.1±0.4**
GDP-4	31	3.800(2931)	5.869(4531)	0.1	1.162(4603)	0.87	652	**14.2±0.4**
GDP-D-1	34	3.165(5156)	5.098(8304)	4.5	1.161(4598)	0.82	550	**13.6±0.3**
QP-1-2	18	8.684(2171)	13.404(3351)	47.6	1.159(4593)	0.87	1437	**14.2±0.5**
QP-8(prismatic)	19	1.523(553)	2.512(912)	25.8	1.157(4588)	0.86	284	**13.3±0.8**
QP-8(rounded)	25	1.225(519)	1.909(991)	66.3	1.155(4583)	0.81	204	**14.0±0.8**

Dating was carried out by the external detector method and internal crystal surface was used. Ages were calculated using dosimeter glass NIST-SRM612 and samples were irradiated at the pneumatic tube of JRR-3 of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Zeta value 377.9±5.1 for the JRR-4 was used instead. ρ=track density; N=total number of tracks counted; s for spontaneous, i for induced and d for dosimeter; P(χ^2)=probability of obtaining χ^2 value for v degrees of freedom (where v=number of crystals-1) (Galbraith 1981); r=correlation coefficient between ρ_s and ρ_i; U=uranium content. Ages are shown as pooled ages. Samples GD-2 and GDP-4 with low P(χ^2) values contain uncertainty of non-Poisson variation probably due to heterogeneous Uranium contents within zircon crystals.

適した値であり，13.6±0.3Ma（GDP-D-1），14.2±0.4Ma（GDP-4），14.1±0.4Ma（GD-2）および13.9±0.4Ma（GP-2）が得られた．ジルコンの平均U濃度は550～650ppmである．これらのうちGP-2以外はP(χ^2)が5％よりも小さくχ二乗検定に失格する．このことは本来ポアソン分布に従うべき年代母集団に非ポアソン変動の要素が含まれることを意味し，年代値の計算もPooled ageのほかにMean ageを検討する必要があるとされる（Green, 1981）．しかしながらCentral age±1σ（重み付き平均年代とその誤差；Galbraith and Laslett, 1993）はGDP-4（年代中央値が0.2Ma古くなる）を除いてPooled ageと同一であり，年代計算方法が議論に大きな影響を与えないため全てPooled ageとして表示した．なお検定に失格する理由は，ジルコン中の自発FTの偏在（U濃度の偏在）であり，年代母集団の2σレンジを越えて若い粒子，古い粒子がともに存在することによる．FTの計測に使用されなかった粒子は自発FTの累帯分布が著しくジルコン上に計測エリアを設定できなかった．また計測されたジルコンでも自発FTの太さが途中で変化するなどU濃度の偏在が示唆される粒子が含まれる．

石英斑岩についてはいずれもχ二乗検定に合格する．クレブラ鉱化帯近傍の石英斑岩 (QP-1-2)

第3表　パルカ鉱山の既報の放射年代値との比較一覧
Table 3 Comparison with previously reported radiometric ages of the Pallca mine.

	本研究 (This study)	金属鉱業事業団(2001) (MMAJ, 2001)	五味ほか(1998) (Gomi et al., 1998) 金属鉱業事業団(1998) (MMAJ,1998)	金属鉱業事業団(2003) (MMAJ, 2003)
岩相(Lithofacies)\手法(Method)	Fission-track(Zircon)	K-Ar(Biotite･Feldspar)	K-Ar(Biotite)	Re-Os(Molybdenite)
花崗斑岩(Granite porphyry)	13.9±0.4(GP-2)	12.6±0.4Ma(Feldspar)		
花崗閃緑斑岩	14.1±0.4(GD2)	13.6±0.4Ma(Feldspar)	16.6±0.2Ma	15.03±0.05Ma
(Granodiorite porphyry)	14.2±0.4(GDP4)			
	13.6±0.3(GDP-D-1)			
トーナル岩(Tonalite)		13.7±0.4Ma(Biotite)		
石英斑岩(Quartz prophyry)	14.2±0.5(QP-1)			
	13.3±0.8(QP-8(prismatic))			
	14.0±0.8(QP-8(rounded))			
	( )は試料名, rounded:円磨された捕獲ジルコン. Parentheses are sample names, rounded: rounded zircons captured from surrounding basement.	( )は対象鉱物, トーナル, 花崗閃緑斑岩, 花崗斑岩の順に分化, 得られた年代も前後関係と調和的. 石英斑岩は別の岩系と推定. Parentheses are mineral species. Obtained ages are concordant with intrusive relations in order of tonalite, granodiorite porphyry, granite porphyry.	試料には角閃石も含まれる. Measured biotite fraction contains a small amount of hornblende.	クレブラ鉱化帯坑口から95m地点で採取した石英斑岩を切る輝水鉛鉱脈. Molybdenite vein cutting quartz porphyry, collected 95m from the entrance of the mine adit of the Culebras ore zone.

は14.2±0.5Maであり，自発FT密度（8.6×10^6/cm^2），U濃度（1400ppm）ともに他の試料に比較して著しく高い．ベルリン鉱化帯近傍の石英斑岩岩脈（QP-8）は，柱面を有する自形ジルコンが13.3±0.8Ma（QP-8-prismatic）であり，円磨されたジルコンは14.0±0.8Ma　（QP-8-rounded）である．後者は貫入時に周囲の堆積岩（カルワス層など）から捕獲されたジルコンで本来は古い時代のものであるが，マグマの熱により概ねリセットされた年代を示す．両者とも計測された自発FT数が少なく誤差が大きいが1σの誤差範囲は重なる．

6. 考察

石英斑岩を除くクレブラ複合岩体主要岩相のFT年代は13.6±0.3Ma～14.2±0.4Maであり1σの誤差範囲は一部重なる．既報の黒雲母や長石類のK-Ar年代13.7～12.6Ma（金属鉱業事業団, 2001）に比較すると年代中央値がわずかに古いが概ね調和的な結果といえる．石英斑岩からは14.2±0.5Maおよび13.3±0.8Ma,14.0±0.8Maの年代が得られた．地質図上の分布（第1図(b)）は石英斑岩とスカルン変質帯の形成との密接な関連を示唆するが（金属鉱業事業団，2001），これまで直接的な放射年代が得られていなかった．今回の結果からパルカ近傍の火成岩類が石英斑岩（流紋岩質）も含めて14Ma前後の限られた時代に活動したことが明らかとなった．これはペルー北部地域の広域的な火成活動時代区分（Noble and Mckee, 1999）におけるQuirvilca-Pierina sub-belt（13～15Ma）に相当する．またペルー中央部の主要鉱床群であるIscaycruz, ChungerおよびCerro de Pascoなど，概ね13～15Maの鉱化関連火成岩の年代モード（Bissig et al., 2008）に対比することができる．

野外での観察事実に基づく貫入関係は石英斑岩がクレブラ複合岩体主要岩相よりも先に活動したことを示している（金属鉱業事業団，2001）．このような野外における前後関係は確かな事実であるが，フィッション・トラック年代の誤差範囲を超えるほどの時間差はなかったことを意味する．

第3表に既報の放射年代との比較一覧を示す．このうち花崗斑岩のK-Ar年代12.6±0.4Ma（金属鉱業事業団，2001）は今回得られたFT年代（13.9Ma）に比べて年代中央値が1.3Ma若く，一方花崗閃緑斑岩のK-Ar年代16.6±0.2Ma（五味ほか，1998；金属鉱業事業団,1998）はFT年代（14.1～14.2Ma）に比べて2Ma以上古い．これは岩体の局所的な冷却の違いや，測定された鉱物種の違い，あるいは変質の影響によるものと考えられる．一般に放射年代測定法には測定手法や

鉱物種に大きく依存する「閉鎖温度」が存在し，得られた年代は試料がその温度以下に冷却した時代を示す．例えばジルコンのフィッション・トラック法の閉鎖温度は冷却速度にもよるが210-260℃である（Brandon and Vance, 1992）．K-Ar年代測定においては角閃石が約500℃，黒雲母が約300℃，カリ長石が150～180℃とされる（例えば佐藤ほか，1986；柴田，1991；兼岡，1998）．花崗斑岩のやや若い値12.6Ma（金属鉱業事業団，2001）については，三井金属鉱業㈱社内資料によれば測定対象が白色鉱物フラクション（主に長石類）とされ，閉鎖温度が低温であることから，より低温まで冷却した時期を示している可能性がある．一方，花崗閃緑斑岩の16.6Ma（五味ほか，1998；金属鉱業事業団，1998）については，三井金属鉱業㈱社内資料によれば測定対象の黒雲母のK量は3.7％と通常（6-8％）よりも低く角閃石混入が認められるとされる．角閃石のK-Ar系の閉鎖温度は約500℃と高いことから，より高温時の古い年代を見かけ上示している可能性もある．

石英斑岩については，クレブラ鉱化帯近くの石英斑岩（QP-1-2）のジルコンのU濃度は約1400ppmであるのに対し，ベルリン鉱化帯近傍で採取された石英斑岩（QP-8）のジルコンのU濃度は200～280ppmであり，両者のU濃度は約5倍異なる．クレブラ複合岩体主要岩相のジルコン（550-650ppm）に比較すると前者は約2倍，後者は約半分のU濃度である．また両者のジルコンの結晶形態も大きく異なる．岩石の化学組成の特徴から石英斑岩を形成したマグマはクレブラ複合岩体主要岩相のそれとは性質が異なることが指摘されているが（金属鉱業事業団，2001），ジルコンのU濃度や結晶形態の差異もこのことを支持する．また石英斑岩のなかにも複数の性質の異なるマグマ活動の存在が示唆される．

まとめ

パルカ鉱山の鉱化関連火成岩のジルコンのフィッション・トラック年代を測定した．クレブラ複合岩体主要岩相から13.6Ma，13.9Ma，14.1Maおよび14.2Maが得られた．またスカルン変質帯との密接な関連が示唆される石英斑岩（流紋岩質）から14.2Maおよび13.3～14.0Maの値が得られた．これらの年代はいずれも中期中新世の限られた時代範囲を示し，IskaycruzやCerro de Pascoなどの経済的に重要な鉱床群の鉱化関連火成岩の年代と調和的である．

ジルコンのU濃度や結晶形態はクレブラ複合岩体主要岩相と石英斑岩（流紋岩質）とでは異なり，また二つの石英斑岩試料ではさらに大きく異なる．これらの事実は火成活動が性質の異なるマグマに由来する可能性を示唆する．特にクレブラ鉱化帯近傍の石英斑岩（QP-1-2）のジルコンは錘面が発達していないものが多く，そのU濃度は1400ppm以上と他の岩相のジルコンに比べて著しく高い．一方ベルリン鉱化帯付近の試料（QP-8）には火成岩起源の柱状ジルコンと，貫入時に周囲の基盤堆積岩から捕獲された円磨されたジルコンが含まれ，U濃度はともに低い．堆積岩起源の円磨されたジルコンの年代は捕獲時の熱で概ねリセットしている．

謝辞

本研究を進めるにあたり三井金属鉱業株式会社および同ペルー支社，サンタルイサ鉱業株式会社および三井金属資源開発株式会社の関係者の皆様には試料採取に便宜を図っていただいた．日本原子力研究開発機構（JAEA）原子力科学研究所の皆様には中性子の照射に際してご協力いただいた．アブストラクトおよびキャプションは本学のBarry Roser氏に校閲していただいた．電力中央研究所の伊藤久敏氏および金沢大学の長谷部徳子氏には査読を通して貴重なご指摘とご意見を賜った．以上の皆様に心より感謝申し上げます．

参考文献

Baumgartner R., 2007, Source and evolution in space and time of hydrothermal fluids at the Cerro de Pasco Cordilleran base metal deposit, Central Peru. Ph. D thesis, University of Geneva, Switzerland. Terre & Environment 66, 167p.

Bissig T., Ullrich T.D., Tosdal R.M., Friedman R. and Ebert S., 2008, The time-space distribution of Eocene to Miocene magmatism in the central Peruvian polymetallic province and its metallogenetic implications. Journal of South American Earth Sciences, 26, 16-35.

Brandon M.T. and Vance J.A., 1992, Tectonic evolution of the Cenozoic Olympic subduction complex, Washington State, as deduced from fission track ages for detrital zircons. American Journal of

Science，292：565-636.
Dunkl I.，2002，Trackkey：a windows program for calculation and graphical presentation of fission track data. Computers & Geosciences, 28, 3-12.
藤井広太郎，藤井昇，徳永哲信，村上龍介，2007，パルカ鉱山の開発について．資源と素材，123，190-195.
Galbraith R.F., 1981, On statistical models for fission track count. Math Geol，13：471－478.
Galbraith R.F. and Laslett G.M., 1993, Statistical models for mixed fission track ages. Nucl. Tracks Radiat. Meas. 21, 459-470.
Gleadow A.J.W., Hurford A.J. and Quaife R.D., 1976, Fission track dating of zircon: improved etching techniques. Earth and Planetary Science Letters. 33, 273-276.
Green P.F., 1981, A new look at statistics in fission-track dating. Nucl. Tracks, 5, 77-86.
Hurford A.J. and Watkins R.T., 1987, Fission track age of the tuffs of the Buluk Member, Bakate Formation, Northern Kenya: a suitable fission track age standard. Chem. Geol. (Isot Geosci Sect), 66, 209-216.
Hurford A.J. and Green P.F., 1983, The zeta age calibration of fission track-dating. Isot. Geosci., 1, 285-317.
五味篤，川崎正士，村上尚義，桜井若葉，1998，ペルー共和国パルカ地域の探鉱とクレブラ鉱化帯の発見．資源地質，48，9-26.
兼岡一郎，1998，年代測定概論．東京大学出版会，315pp.
金属鉱業事業団(MMAJ)，1998，海外地質構造調査報告書（平成9年度）ペルー中部地域．1-68.
金属鉱業事業団(MMAJ)，2001，海外地質構造調査報告書（平成12年度）ペルー中部地域（総括）．1-71.
金属鉱業事業団(MMAJ)，2003，海外地質構造調査報告書（平成14年度）ペルーチキアン東部地域．1-99.
Noble D.C. and Mckee E.H., 1999, The Miocene metallogenic belt of central and northern Peru, In: Skinner B.J. (Ed.), Geology and Ore Deposits of the Central Andes: Society of Economic Geologists Special Publication No.7 Littleton, Colorado. pp.155-193.
大平寛人，2004，埼玉県比企丘陵および荒川河岸に分布する第三紀中新世凝灰岩のFT年代地団研専報，52，51-65.
大平寛人・永井淳也，2004，放射年代学（FT法）入門．地球科学，58，185-189.
佐藤興平，柴田　賢，内海　茂，1986，丹沢トーナル岩質岩体の角閃石と黒雲母のK-Ar不一致年代．地質学雑誌，92，439-446.
柴田　賢，1991，カリ長石のK-Ar年代と閉鎖温度．地質ニュース，437，7-14.
Silberman M.L. and Noble D.C., 1977, Age and igneous activity and mineralization, Cerro de Pasco, Central Peru. Economic Geology, 72, 925-930.
Soler P. and Bonhomme M.G., 1988, Oligocene magmatic activity and associated mineralization in the polymetallic belt of Central Peru. Economic Geology, 83, 657-663.