

論文

流体包有物から見た島根県大田市周辺のゼオライト化変質

大平 寛人*・三角 寿**

Zeolitization around the Oda city, Central Shimane, SW Japan, based on fluid inclusion studies.

Hiroto Ohira* and Hisashi Misumi**

Abstract

Several zeolite resources are distributed around Oda City. Zeolite-bearing rocks in this area were formed by hydrothermal alteration following the eruption of pyroclastic rocks in shallow marine environments during middle Miocene period. In the Nagatani area a hard greenish zeolite-rich rocks (mordenite) are quarried at a small open pit mine. Similarly, in the Isotake area, porous and soft zeolite-rich rocks (clinoptilolite) are exploited in large under-ground mine. Zeolite-bearing rocks in both mines contain quartz or calcite veins, which were formed by infiltration of hydrothermal fluids during or after the eruption of the host pyroclastics. Fluid inclusion data from quartz veins in the Nagatani area show a wide temperature range of 120–300°C with a clear mode at 190–200°C, and low salinity of 0.0–0.7 wt%. In contrast, calcite veins from the Isotake area have a lower temperature range of 120–210°C, with a mode at 165°C. Salinity is range from 0.3 to 0.8 wt%, with a mode at 0.5 wt%. Although the highest filling temperatures from both mines may not completely correspond to the temperature of zeolitization, the variations in temperatures between the two areas is compatible with difference in geological setting of the mines. Zeolite-rich rocks in the Nagatani mine were formed during severe hydrothermal alteration produced by adjacent glassy rhyolites. In the Isotake area, the zeolitic rocks occur in permeable tuff layers, separate from the stockwork ore body of the Iwami Kuroko-type deposit which precipitated in the breccias of a rhyolitic intrusion. The extremely low salinity data from both mines suggests that meteoric water was dominant in the hydrothermal fluid, from hydrological circulation from inland through to the shallow sea floor.

Key words: zeolite, zeolite resources, fluid inclusions, hydrothermal alteration, Shimane Prefecture

1. はじめに

島根県の大田市周辺から島根半島にかけては新第三紀中新世中期のグリーンタフ活動とそれに伴う熱水変質作用によって形成された鉱物資源が広く分布する。かつては黒鉱や石膏が採掘されたが現在は工業鉱物資源として主にゼオライトやベントナイトが採掘されている。大田市街の西方の五十猛地域では三井金属資源開発(株)石見鉱業所によりクリノプチロライト(斜プチロル沸石)を主とするゼオライト岩が大規模に採掘されている。また大田市街の東方の長谷地域ではモルデナイト(モルデン沸石)からなるゼオライト岩が採掘されている。これ以外に大田市仁摩町でもゼオライト岩(モルデナイト)が採掘されている。この地域のゼオライト岩は岩相が比較的均質で陽イオン交換能(CEC)が120~180 meq/100 gと高く製品としての付加価値が高い。このほか大田市朝山町周辺ではベントナイトが採掘される。これらの工業鉱物資源は主に新第三紀中新世中期久利期(約1500万年前)の海域に

おける流紋岩~デイサイト質火砕岩の噴出とそれともなう熱水変質あるいはその後の続成変質により形成されたと考えられる。本論では現在ゼオライト岩を採掘する地域のうち、長谷地域と五十猛地域について、これまでに明らかにされているゼオライト岩の分布や産状についてまとめ、石英や方解石脈の流体包有物温度などから両地域の熱水変質について検討した。

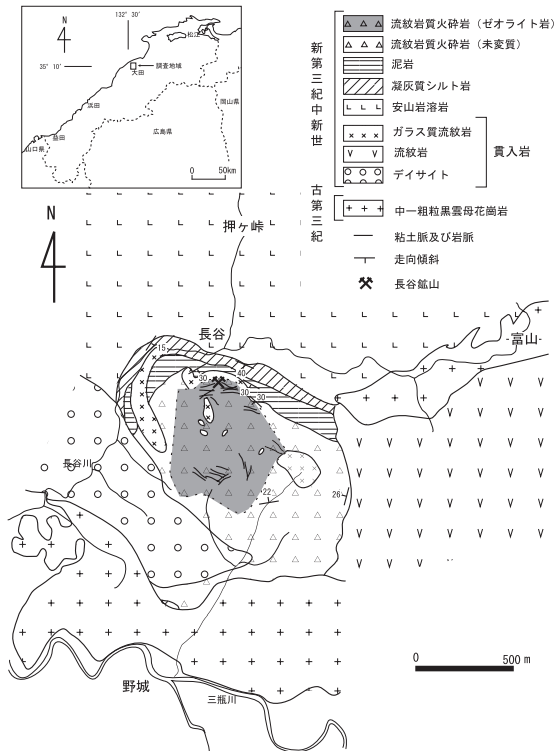
2. 地質概要

(1) 長谷地域の地質とゼオライト岩

長谷地域は大田市を中心街から約5 km 東に位置し、東から西へ流れる三瓶川の支流、長谷川の谷部の南側にゼオライト鉱床が分布し露天採掘されている。長谷鉱山を含む約3 km × 2.5 km の範囲の地質図(三角・大平2005)を第1図に示す。この地域は主に古第三紀の基盤花崗岩と新第三紀中新世の久利層からなる。安山岩溶岩、デイサイトおよび流紋岩貫入岩、流紋岩質凝灰岩など、火山岩及び火砕岩が同地域の大部分を占める。長谷鉱山および周辺の限られた範囲には凝灰質シルト岩および泥岩などの堆積岩が分布する。層序は下位から基盤である古第三紀野城花崗岩、新第三紀中新世の久利層安山岩溶岩、凝灰質シルト岩、泥岩、流紋岩質火砕岩である(三

* 島根大学総合理工学部地球資源環境学科
Department of Geoscience, Shimane University, 1060 Nishikawatsu,
Matsue, Shimane 690-8504, Japan.

** 深田サルベージ建設株式会社東京支社国際部
Fukada Salvage & Marine Works Co., Ltd. Tokyo Office, 3-8-7
Iidabashi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0072, Japan.



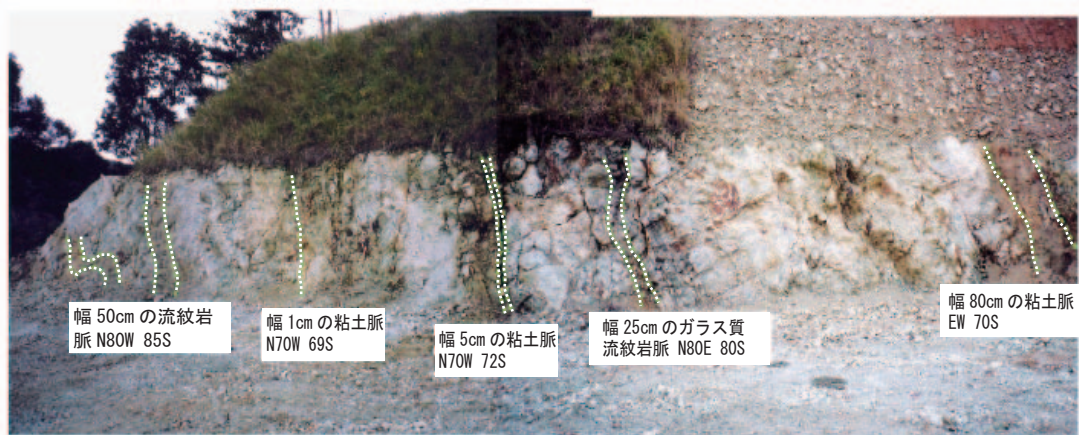
第1図 大田市長谷地域長谷鉱山周辺の地質図(三角・大平, 2005)

角, 2006) これらのうち流紋岩質火砕岩の一部がゼオライト化しておりゼオライト岩として採掘される。第1図のグレーの範囲がゼオライトに富む部分で、鉱山はその範囲の北縁に位置する。ゼオライトはモルデナイトからなり、南部の尾根では一部クリノプチロライトも分布する。なお鉱床母岩であるこの火砕岩は半盆状の地質構造に規制されて分布する(三角, 2006)。鉱山内では鉱山入口から採掘場へ向かう搬入路に沿って、久利層安山岩溶岩、凝灰質シルト岩、泥岩及びゼオライト化した流紋岩質火砕岩が分布する。流紋岩質火砕岩は主に凝灰角礫岩～凝灰岩で、鉱山下部では火山角礫岩をとまう。火砕岩中にはガラス質流紋岩脈や粘土脈が網の目状

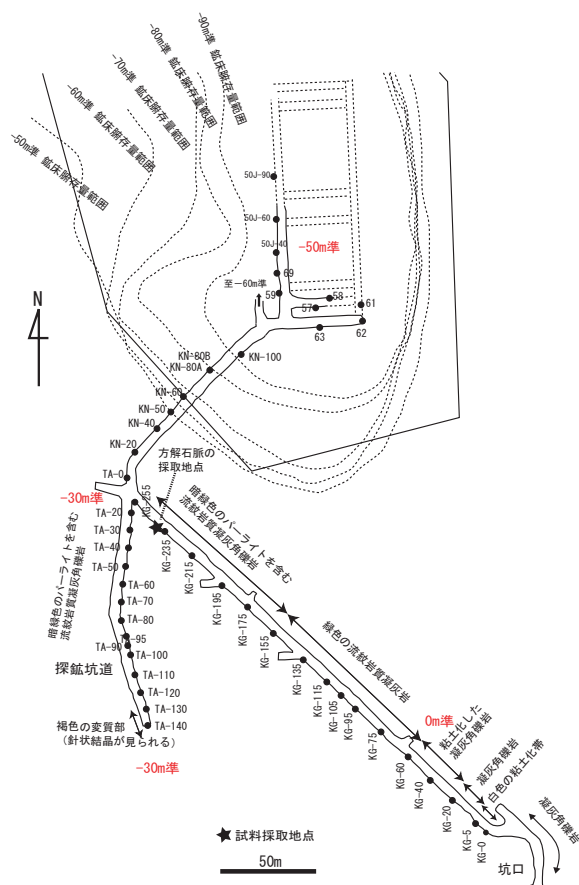
に分布しており、採掘場最上部の壁にはガラス質流紋岩から派生した幅数～数10cmの岩脈および粘土脈が平行に存在するのが確認できる(第2図)。なお採掘場の第2図の範囲外ではハロイサイトからなる粘土化帯が分布し、この粘土化帯は下方の重機搬入路沿い(約30m下)まで連続しており、ここでは幅数10cmの粘土脈として存在する。粘土化帯は上向きのラッパ状に分布し熱水活動の後期に形成されたと考えられる。長谷地域のゼオライト鉱床は流紋岩質火砕岩の噴出にひき続いて貫入したガラス質流紋岩による熱水変質と密接に関連して形成されたと考えられる。このことは長谷地域で観察される以下の事実に基づく。(1) 流紋岩質火砕岩分布域の一部が変質を受けてゼオライト化している。(2) ゼオライト岩にはガラス質流紋岩や派生岩脈が多数貫入している。(3) ガラス質流紋岩脈自身も一部ゼオライト化している。(4) ガラス質流紋岩および派生岩脈及び粘土脈はゼオライト岩の分布範囲と調和的に環状に分布している。ことなどである(三角, 2006; 三角・大平, 2006)。

(2) 五十猛地域の坑道とゼオライト岩

五十猛地域は大田市の中心街から西方約5kmに位置し、かつて黒鉱を採掘したゼオライト鉱山がある(鹿野ほか, 1998)。現在の坑道の概略を第3図に示す。ゼオライトを採掘する坑道は久利層の流紋岩質火砕岩中にある。この鉱山ではかつて近傍の-30m～-120m準から高品位の網状黒鉱を採掘した(吉田, 1979)。黒鉱は300×200m規模の凝灰角礫岩からなる半円筒状の角礫パイプ中に胚胎され、特に自破碎流紋岩中に高品位黒鉱鉱体を産し、その上位および周囲では凝灰角礫岩が変質帯をともなって分布するとされる(物部, 1972; 吉田ほか, 1977; 吉田, 1979)。現在採掘されているゼオライト岩は黒鉱鉱体の周囲あるいは上位に相当し、比較的均質で軟質の凝灰岩を含む火砕岩がゼオライト化したもので、主に斜プチロ沸石からなる。黒鉱変質帯の形成モデル(Utada, 1988)を考慮すれば、本地域のゼオライト岩は黒鉱形成期から後黒鉱ステージ(Post-Kuroko stage)に堆積した流紋岩質火砕岩の一部がその近傍直下の流紋岩による熱水変質

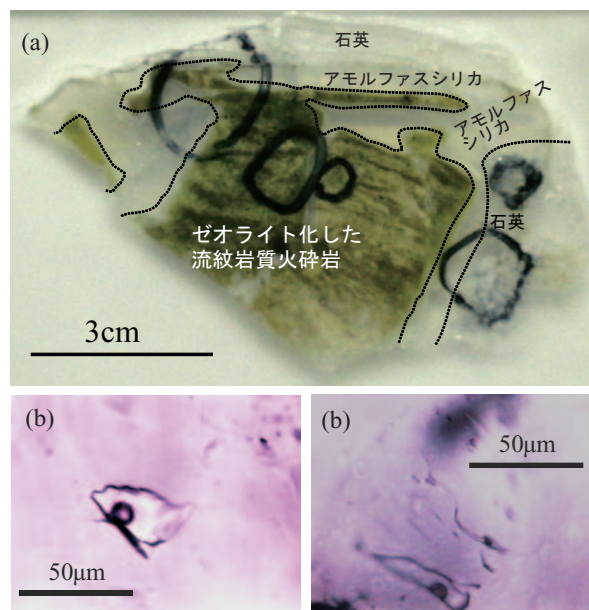


第2図 長谷地域の鉱山の採掘場最上部の壁に見られる平行岩脈と粘土脈。微細なシリカ鉱物脈も多数見られる。



第3図 五十猛地域の坑道図

あるいはその後の続成変質を受けて形成したと考えられる。坑道内では坑口から凝灰岩礫岩、粘土化帯、緑色の流紋岩質凝灰岩、暗緑色のパーライトを含む流紋岩質凝灰岩礫岩などが観察される(第3図)。詳しい鉱物組み合わせは省略するが、坑口からおおまかにスメクタイト、斜プチロル沸石+スメクタイト、斜プチロル沸石などが優勢なゾーンが分布し、-30 m 準では斜プチロル沸石が卓越する。三井金属資源開発(株)石見鉱業所の資料によれば、ゼオライト岩の貯存範囲(富鉱部)は深部から上方へ向かって広がる半円筒状に存在する(第3図)。このことはゼオライト形成に関与した熱水が流紋岩質火砕岩中を半円筒状に上方へ広がりながら浸透したことを示唆する。大田市周辺の久利層の変質については続成変質(歌田・湊, 1972)や熱水変質(酒井ほか, 1980)、両者の重複(井上ほか, 1981)など多様な場合がある。本地域では黒鉱鉱体(自破砕流紋岩)の近傍であることや前述の鉱床貯存範囲の状況などから熱水の影響が優勢であると考えられる。坑口近くにはゼオライト岩を切るように粘土化帯が分布し、坑口付近以外にもボーリングデータによってその存在が確認されている。これらの粘土化帯も長谷地域と同様に熱水活動後期の産物と考えられる。また現在は埋め戻されているが、探鉱坑道(第3図)の先端部付近には淡赤褐色の変質ゾーンが存在し、実体鏡下で微細な柱状石膏が観察される。このように鉱床母岩の流紋岩質火砕岩はその噴出後に、伏在する流紋岩の活動に由来する多様な熱水の作用を被っている。



第4図 (a)長谷地域のゼオライト岩中のシリカ鉱物脈と(b)流体包有物

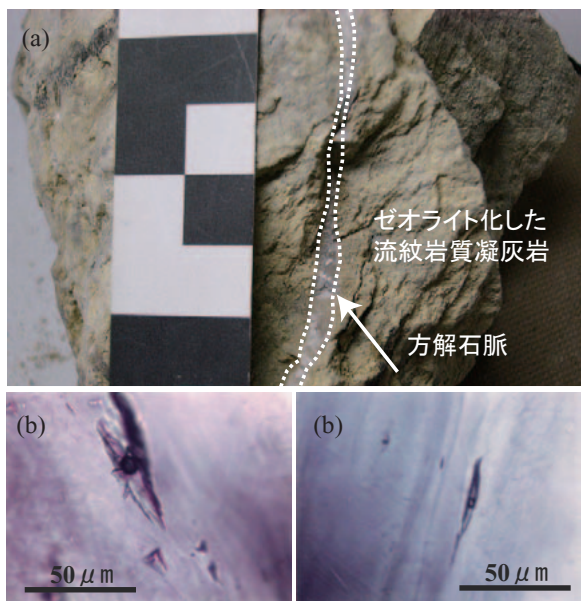
3. 流体包有物温度

(1) 流体包有物

両地域の変質に関与した熱水を検討するため、ゼオライト岩に胚胎するシリカ鉱物および方解石脈から流体包有物の均質化温度および融点を測定した。流体包有物は熱水から鉱物が晶出する際に鉱物内部に捕獲された当時の熱水である。流体捕獲時の環境にもよるが通常は気相と液相の二相からなる包有物として存在する。気液二相の流体包有物を加熱すると内圧の上昇とともに次第に気相が小さくなり、最終的に気相が消滅して液相一相に変化する。このときの温度を均質化温度といい、一般に浅熱水系の場合には熱水が捕獲された温度とされる(佐脇, 2003)。一方流体包有物を液体窒素により冷却し凍結(-50℃)させ、その後ゆっくりと加熱していき氷が完全に消滅するときの温度を融点といい、融点からNaCl換算の塩濃度を求めることができる。

(2) 試料と流体包有物の産状

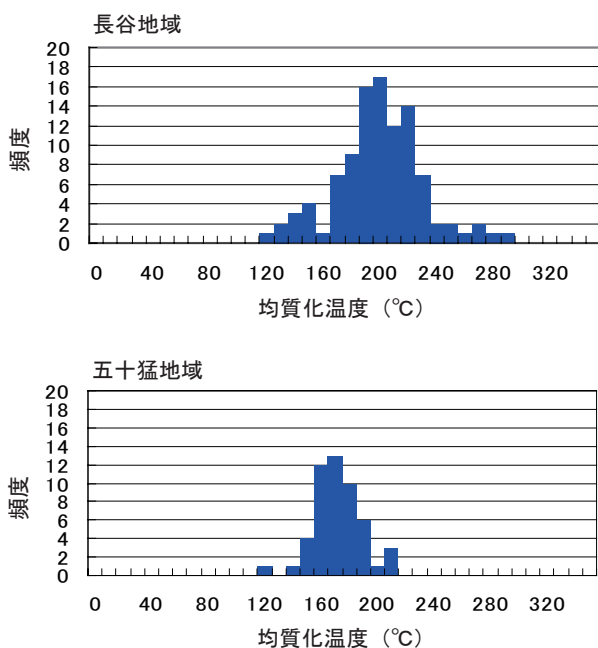
長谷地域では淡緑色を呈するゼオライト岩中に白色鉱物が幅数mm~2cmの板状、不定形、脈状に存在する。この白色鉱物はガラス質流紋岩の近傍で比較的多いが現在の採掘場全体に認められる。板状白色鉱物の走向傾斜はゼオライト岩に貫入するガラス質流紋岩とその派生岩脈の走向傾斜と調和的な傾向を示す。試料は長谷鉱山の重機搬入路および採掘場から合計12試料を採取しダイヤモンドペーストなどを使用して75枚の両面研磨チップを作成した。ほとんどの白色脈は鏡下で繊維状を呈するアモルファスシリカで流体包有物は含まれなかったが、一部の試料ではアモルファスシリカ脈の中央部に石英が生成しており(第4図a)、径30µm程度の主に気液2相の流体包有物が確認できた(第4図b)。流体包有物の形態は、楕円型、不定形、三角形など多様であるが、不定



第5図 (a) 五十猛地域のゼオライト岩中の方解石脈と (b) 流体包有物

形のものでは一部ネッキングした産状を示すものがありそれらは測定から除外した。

五十猛地域では坑道に沿って多数の試料を採取し観察したが熱水の痕跡である脈状鉱物はほとんど観察されなかった。脈状の鉱物が認められたのは坑口から約 235 m 付近（一約 30 m 準）の試料で幅約 5 mm の方解石脈である（第 5 図 a）。五十猛地域のゼオライト岩に充填されている脈状鉱物が少ないことは、鉍床母岩の流紋岩質凝灰岩が比較的軟質で孔隙率が高く熱水が浸透拡散しやすいためと考えられる。採取された方解石脈中には気液二相の多数の包有物が認められ、不定形、



第6図 流体包有物の均質化温度（長谷地域は石英脈，五十猛地域は方解石脈）

レンズ状、チューブ状、紡錘形など多様な形態を呈する（第 5 図 b）。また流体包有物のサイズは長谷地域と同様に 30 μm 程度であるが、不定形～レンズ状のものでは約 50 μm の大きさのものも認められた。

(3) 均質化温度と塩濃度

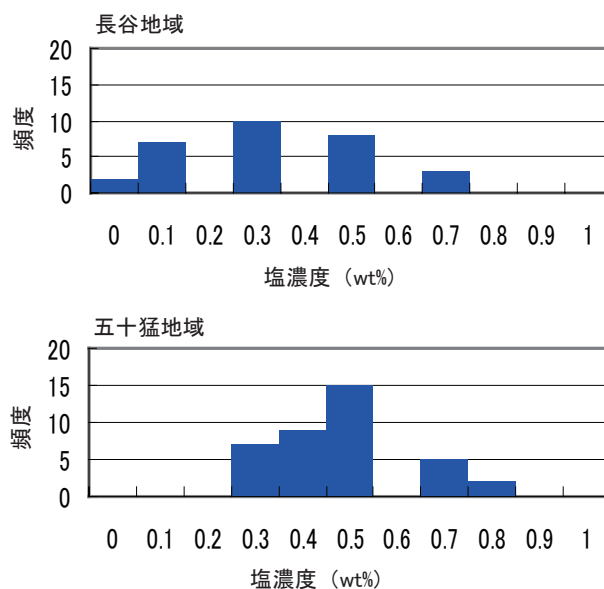
実験には本学の Linkam 製の加熱・冷却ステージ LK-600 PM を使用した。均質化温度測定時の昇温速度は 5°C/min とし均質化直前に昇温を停止し試料と試料台との温度勾配を最小にするよう努めた。一方融点測定のための試料の冷却には液体窒素を用い、加熱時の最終昇温速度は 2°C/min とした。融点から塩濃度 (NaCl 換算) を求める際には Bodnar (1993) による換算式を用いた。

第 6 図および第 7 図に均質化温度の測定結果と融点から求めた塩濃度 (NaCl 換算) を頻度分布として示す。長谷鉍山の石英脈から測定した 112 個の均質化温度結果は 120~300°C と広い温度幅を持ち、190~200°C の付近にモードがあるように見える（第 6 図）。このうち 40 個について融点を測定し得られた塩濃度は 0.0~0.7 wt% の値を示し 0.3 wt% のものが多い（第 7 図）。一方、五十猛地域の方解石脈については、51 個の均質化温度を測定した結果 120~210°C の温度範囲を示した。頻度分布では 160~170°C 付近にモードが存在するように見える（第 6 図）。また、均質化温度を測定したうちの 37 個について求めた塩濃度は 0.3~0.8 wt% の値を示し平均値はおおよそ 0.5 wt% である（第 7 図）。

4. 考 察

(1) 流体包有物からみた熱水変質

長谷地域のゼオライト岩中の石英脈の均質化温度は 120~



第7図 融点から求めた流体包有物の塩濃度 (NaCl 換算)（長谷地域は石英脈，五十猛地域は方解石脈）

300℃と幅広い値を示し、190~200℃にモードを有する。融点から求めた塩濃度は0~0.7%と幅広く低い値である。後述する五十猛地域の方解石脈のデータと比較すると、温度モードは30℃以上高く、塩濃度はわずかに低い。前述したようにシリカ細脈は長谷鉾山に広く分布し、鉾山区域外の南部のゼオライト岩分布域にも認められ、ゼオライト岩の形成に関連すると考えられる。変質分帯の研究などからモルデナイトの生成温度は一般には比較的低温と考えられているが、変質分帯の形成は温度以外の様々な要因に左右されるため、一応の目安としてみる必要がある(例えば吉村, 2001)。一方、カルデラ地域など地温勾配の非常に高い地域の地熱変質帯においてはゼオライトの形成環境は多様である。例えばUtada et al (1999)は三途川火山性陥没地域において坑井温度80~160℃の範囲にモルデナイトが出現することを示し、既報の室内実験データを加味しながら、モルデナイトの形成温度を100℃<から<200℃と推定している。前述したように長谷地域は半盆状を呈する火砕岩の噴出中心であることから、同様に地温勾配が高かったことが推定される。今回得られた均質化温度は既報のモルデナイトの生成温度と全く矛盾するものではないが、かなり高温である。このことは、例えば、測定された流体包有物温度のうち高温のものはゼオライト化のステージに対応するものではなく、それに先立つ熱水活動の温度を示しているのかもしれない。このことについては今後さらに検討する必要がある。いずれにせよこのような高温の熱水が流紋岩質火砕岩噴出後に浸透し温度の低下とともに岩石の変質に寄与したことが推定される。

一方、五十猛地域の方解石脈の流体包有物温度は120~210℃の値を示し、160~170℃付近にモードがあり長谷地域の石英脈の温度よりも30~40℃低温である。また長谷地域の石英脈と比較して温度の幅が狭い。一般に斜プチロル沸石は沸石帯のなかでも最も低温で形成されると考えられ、例えば100℃以下で形成する場合が多い(Utada et al., 1999)。このことから五十猛地域の方解石脈の流体包有物温度もゼオライト化のステージには対応していない可能性もある。前述したように五十猛地域では近傍の同深度に伏在する自破砕流紋岩から、かつて高品位の層状黒鉾や網状黒鉾が採掘された。さらにゼオライト採掘場近傍の-30m~-105m準の黒鉾鉾体中の石英脈と閃亜鉛鉾からは240℃~270℃付近にモードを有する高温の流体包有物温度が報告されている(吉田, 1979)。今回得られた方解石脈の温度データは160~170℃にモードを有するが、同深度近傍での黒鉾形成時に240℃~270℃の高温の熱水が作用していたことを考慮すれば調和的な値であるように思える。Yoshida et al. (1981)は五十猛地域を含む広範囲のボーリング試料から方解石の流体包有物温度と塩濃度を報告した。それによれば石見鉾業所の北東約2kmのJR弓辺トンネル付近のボーリング試料でモルデナイトが優勢なゾーンよりも深部(深度502m)から165℃~180℃の充填温度が報告されている。また他の久利層の試料の方解石も概ね162~198℃の均質化温度を示し、NaCl換算の塩濃度は0.5~0.7%と低いことも述べられている。今回得られた温度データや塩濃度はこれらの結果と大きく異なるものではな

い。五十猛地域では黒鉾鉾体の周囲および上位に相当する流紋岩質凝灰岩に150℃を超える熱水が作用し、それらが温度の低下とともに広く浸透したことが推定される。流体包有物温度とゼオライト化ステージとの関連については検討の余地があるが、温度の違いは両地域の火砕岩噴出に関わる地質学的条件と調和的であるように見える。

(2) 熱水変質と古地理との関連

大田市周辺の久利層堆積時(約1500万年前)の古地理図(高安ほか, 1988)によれば、現在の大田市の周辺には海域(大田湾入部)が発達していた。現在の五十猛地域および長谷地域は海域の比較的縁部(陸域に近い部分)に位置すると考えられる。長谷地域では泥岩などの堆積岩が少なく古第三紀の基盤がすぐ近くに存在することから、五十猛地域と比較してより陸域に近かったものと考えられる。このような流紋岩質火砕岩の噴出場の違いや熱源との関連などが両地域のゼオライト岩の形成と密接に関連しているように思える。長谷鉾山ではゼオライト岩は硬質で流紋岩の本質岩片を含む凝灰角礫岩(一部火山角礫岩)が優勢であるのに対し、五十猛地域では一部パーライトを伴うが、岩片が少なく軟質で(孔隙率の高い)均質な凝灰岩がゼオライト岩として採掘される。また前者では鉾床母岩にガラス質流紋岩が直接貫入しているのに対し、後者は伏在する自破砕流紋岩からやや離れている。ゼオライト岩中の脈状鉾物に関しては長谷地域では微細なアモルファスシリカや石英脈が多数充填し高温であるのに対し、五十猛地域では方解石脈がわずかに見られる程度で温度も低い。

塩濃度については長谷と五十猛でそれぞれ0~0.7wt%(約0.3wt%)および0.3~0.8wt%(約0.5wt%)であり、両地域とも海水の1/10程度である。大田市周辺の広域的なボーリング試料の方解石脈の流体包有物から報告された塩濃度も概ね0.5~0.7%と低い(Yoshida et al, 1981)。鉾床母岩である流紋岩質火砕岩は海域で噴出・堆積したと考えられるが、熱水変質に関しては陸域の地下水の影響が強かったことを示唆する。このことは活発な地熱帯の海岸付近や浅海の熱水性シリカ鉾物の流体包有物の塩濃度が真水に近い値を持っていることと調和的である。例えば大分県の別府地域では、内陸側の鶴見岳周辺からの陸域起源の地下水が沿岸部の海底で湧き出すような広域的な熱水流動モデルが推定されている(NEDO, 1990)。

5. ま と め

大田市周辺にはゼオライト鉾床が広く分布する。長谷地域ではモルデン沸石を主とするゼオライト岩が鉾山を含む広い範囲に分布する。ゼオライト岩は流紋岩質火砕岩(火山角礫岩をとまなう凝灰角礫岩~凝灰岩)の一部が熱水による変質を受けたもので、火砕岩噴出後のガラス質流紋岩の貫入にともなう熱水変質により形成された。一方五十猛地域のゼオライト岩は、黒鉾鉾体の周囲および上位に相当する流紋岩質凝灰岩が主に熱水による変質を受けて形成された軟質の岩石で

主に斜ブチロル沸石からなる。流体包有物温度は長谷鉱山の石英脈では120~300℃と広い温度幅を示し、190~200℃の付近にモードがある。一方、五十猛地域の方解石脈では120~210℃の温度を示し160~170℃付近にモードがある。このような高温の熱水が火砕岩に浸透し変質に寄与したと考えられる。測定された流体包有物温度の一部はゼオライト化の温度と直接対応するものではない可能性もあるが、温度の違いは両鉱山の鉱床母岩である流紋岩質火砕岩の噴出場や熱源に関わる地質学的条件と調和的であると考えられる。流体包有物の塩濃度が低いことは、熱水として陸域起源の地下水が関与したことを示唆する。

6. 謝 辞

三井金属資源開発(株)石見鉱業所の田平康夫氏には試料採取に際して便宜を図っていただき鉱山全般に関するご指導を賜った。同社本社資源事業部橋本守男氏には地質に関する様々なご指導をいただいた。(有)池田建設の池田卓司氏には試料採取にご協力いただき地質に関して様々なアドバイスをいただいた。福岡大学の田口幸洋氏には流体包有物に関してご指導いただいた。本学のバリー・ロザー氏にはアブストラクトに目を通していただいた。島根大学名誉教授山内靖喜氏には長谷地域の地質に関して議論していただいた。以上の方々に感謝いたします。

7. 引用文献

- Bodnar R. J. (1993) Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 59, 683-684.
- 井上多津男・酒井禮男・飯塚信之 (1981) 島根県大田市朝山町付近の中新統の層序と変質。島根県立工業技術センター研究報告, 18, 20-28.
- 鹿野和彦ほか (1998) 石見太田及び大浦地域の地質。地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所 119 p.
- 三角 寿・大平寛人 (2005) 島根県大田市長谷地域の地質とゼオライト化変質。島根県地学会誌, 20, 81-85.
- 三角 寿 (2006) 島根県大田市長谷及び五十猛地域の地質とゼオライト化変質。2005年度島根大学総合理工学研究科(地球資源環境学専攻)修士論文, 95 p.
- 三角 寿・大平寛人 (2006) 島根県大田市周辺のゼオライト化変質とFT年代。フィッション・トラックニュースレター, 19, 19-24.
- 物部長進 (1972) 石見鉱山の下部探鉱について。鉱山地質, 22, 121-128.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (1990) 平成元年度全国地熱資源総合調査(第3次)広域熱水流動系調査鶴見岳地域地熱調査成果図集, 66-68.
- 酒井禮男・井上多津男・飯塚信之 (1980) 島根県大田市北部の火砕岩の変質—とくにフェリエライトの産状について—。島根県立工業技術センター研究報告, 第17号, 52-61.
- 佐脇貴幸 (2003) 流体包有物—その基礎と最近の研究動向—(総説)。岩石鉱物科学, 32, 23-41.
- 高安克巳・山崎博史・上田哲郎・赤木三郎・松本俊雄・野村律夫・岡田昭明・沢田順弘・山内靖喜・吉谷昭彦 (1992) 山陰地方の中新統層序と古地理。地質学論集, 37, 97-116.
- 歌田 実, 湊 秀雄 (1972) 島根県西部(仁摩—温泉津地区)の新第三紀凝灰岩に見られる沸石の累帯分布。地質学雑誌, 78, 329-340.
- Utada M. (1988) Hydrothermal alteration envelope relating to Kuroko-type Mineralization: a review, *Mining Geology Special Issue*, 12, 79-92.
- Utada T., Shimizu M., Ito T., Inoue A. (1999) Alteration of caldera-forming rocks related to the Sanzugawa volcanotectonic depression, Northeast Honshu, Japan—with special reference to caldera-type zeolitization. *Resource Geology Special Issue*, No.20, 129-140.
- 吉田哲雄・井沢英二・森本憲秀 (1977) 島根県石見鉱床における熱水変質作用。鉱山地質, 27, 181-189.
- 吉田哲雄 (1979) 流体包有物から見た島根石見鉱床の形成過程について。鉱山地質, 29, 21-31.
- Yoshida T., Mukaiyama H. and Izawa E. (1981) Alteration in the Iwami Kuroko Mining District, Shimane Prefecture, Japan. *Mining Geology*, 31, 367-381.
- 吉村尚久 (2001) 粘土鉱物と変質作用。地学双書 32, 地学団体研究会, 293 p.