

# 福井県丹生山地の新第三系中の沸石鉱物

服 部 勇\*

## Zeolite minerals in the Neogene Tertiary of the Niu Mountains, Fukui Prefecture, central Japan

Isamu HATTORI\*

### Abstract

Microscopic and X-ray analyses indentified many species of zeolite minerals and other secondary minerals in the Miocene Niu Group in Fukui Prefecture. They are analcite, laumontite, mordenite, stilbite, zeolite-CH (heulandite or clinoptilolite), calcite, chlorite and quartz. Their occurrences depend on rock types of the host rocks: mordenite and analcite tend to occur in rhyolitic sedimentary rocks (rhyolitic tuff and sedimentary rocks with rhyolitic fragments), zeolite-CH in andesitic sedimentary rocks (andesitic tuff and sedimentary rocks with andesitic fragments). Laumontite and stilbite occur in both rock types. Abundance of zeolite minerals also depends on the rock types: more abundant in tuffaceous rocks than in clastic rocks, more abundant in coarse-grained rocks than in fine-grained rocks.

The zeolitization of the Niu Group seems to have occurred in a very early stage after the deposition. No clear zonal distribution of zeolite species could be found in the Niu Group. It was inferred that geological rates (deposition rate, upheaval rate, and denudation rate) over the reaction and transforamtion rates with respect to zeolites resulted in non-equilibrium occurrence of zeolites or that the very shallow top and bottom of the zeolite zone make the zonal occurrence unclear.

### はじめに

丹生山地は、西は日本海岸から、東は福武低地の西端までを含む定高性の山地である。山地内の河川沿いの低地部には洪積統や沖積統が発達するが、山地部では中新世の固結した堆積岩や火山岩が分布する。丹生山地のこれらの堆積岩、火山岩は日本海側に広く発達する中新世火山岩・堆積岩の典型的なもの（いわゆるグリーンタフ）である。これらに対する層序学的研究や古生物学的手法

---

\* 福井大学教育地域科学部地域環境講座（〒910-8507 福井市文京3-9-1）

Department of Regional Environment Studies, Fukui University, Fukui 910-8507, Japan

を用いた堆積環境の研究は著しく進展している（竹山, 1989, 安野, 1997, Nakagawa, 1998, 等多数）。それに対して, 堆積岩や火山岩の岩石学的研究は立ち遅れている。その理由の1つに, これらの岩石は, 堆積・噴出後の変質が著しく, 岩石学的研究には, 変質作用（低度変成作用）の検討も不可欠であるからである。

この論文では, 丹生山地（第1図）に分布する固結堆積岩・火山岩を簡単に紹介し, それらの変質作用（低度変成作用, 埋没変成作用）がどのようにして起こったか, また, どのような変質鉱物が晶出しているかについて記載する。

近年, 丹生山地やその周辺地域の中新統における続成作用についての研究が進みつつある。続成作用の研究には, 沸石相などの低度変成作用に関する情報が不可欠である。かつて, 福井大学地学教室に在籍した2名の学生（五十嵐尚美, 1978, 宮越恵子, 1979）は丹生山地の沸石鉱物の分布を卒業研究として調査し, その報告書を卒業論文として提出した。彼女らの成果を文献として引用可能にするために, 筆者が加筆修正し, 公刊することにした。このような経過であるが, 内容に関しては, 筆者に責がある。

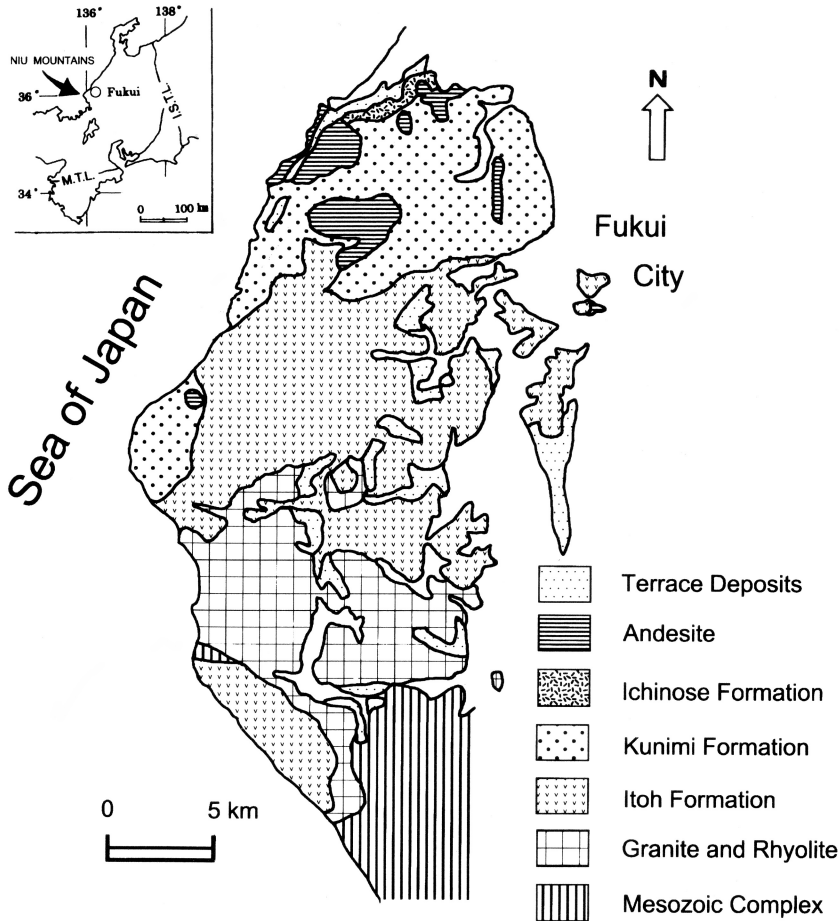
## 地質概説

丹生山地は国見岳（656m）を最高峰とする南北方向に伸びた山地である。地層の分布状況を反映して谷地形と尾根筋ができていて, 全体としては比較的定高性の山地である。

丹生山地に分布する固結岩石は, 基盤岩としての古期岩石類と中新世の火山岩および火山性碎屑物を多く含む堆積岩である。これらの中新世岩石は, 下位より安山岩を主体とする糸生累層, 堆積岩を主体とする国見累層, 流紋岩質凝灰岩からなる市ノ瀬累層（あるいは市ノ瀬層）に区分される。これらを一括した名称はないが, 仮に丹生層群としておく。糸生累層は, 吉野瀬川の南側で, 甲楽城海岸に沿う地域にも分布する。丹生層群の基盤は, 吉野瀬川の南では南条山地中生層及び西谷流紋岩であり, 吉野瀬川の北側では, 花崗岩と流紋岩である。地層区分を第1図の地質分布図に示す。塚野・三浦(1954), 福井県(1982), Nakagawa(1998), および中島ら(1990)によれば, 丹生層群はおおよそ2,000万年前から堆積し始め, 糸生累層と国見累層の境界がおおよそ1,700万年前, 国見累層と市ノ瀬累層の境界がおおよそ1,500万年前である。丹生層群に貫入したり, 丹生層群を被覆したりする約1,500万年前から1,400万年前の安山岩が存在する。丹生層群は中新世における日本海の開裂時（Otofuji and Matsuda, 1983）に陸域と海域の境界付近に堆積した地層群である（友安・梅田, 1985; Nakagawa, 1998）。

丹生山地に分布する安山岩類の大半は糸生累層に区分される。三浦・東(1974) および三浦(1979)は糸生累層を火山層序学的に調査し, 六つの部層を認めた。六つの部層は層序学的単位ではあるが, 岩石学的特徴を持っており, 彼らによると, 下部から, 笹川火山岩層（玄武岩と両輝石安山岩および凝灰角礫岩）, 三尾野火山岩層（玄武岩質安山岩および凝灰質砂岩）, 横山火山岩層（安山岩および凝灰角礫岩）, 布ヶ滝火山岩層（安山岩質凝灰岩）, 大矢火山岩層（ガラス質安山岩と凝灰岩質砂岩・泥岩）, および梅浦火山岩層（輝石安山岩および凝灰岩砂岩）からなっている。





第1図：福井県丹生山地の位置と、そこにおける地質分布。塚野・三浦(1954)を一部修正，簡略化。挿入図のI.S.T.LとM.T.Lは、各々、糸魚川—静岡構造線，中央構造線を示す。

この分類は、甲斐城海岸に沿う糸生累層にも適用される（三浦，1979）。これらの火山岩類についての顕微鏡下での特徴や化学的データを報告した例はない。

糸生累層を不整合で被覆する国見累層は粗粒ないし中粒の砂岩を主体にし、さらに礫岩や泥岩を含む。全体に凝灰岩質であるが、多くの凝灰岩層も挟む。凝灰岩は、下位のは安山岩質であり、上位のは流紋岩質（石英粗面岩質）であるが、最上位になると再度安山岩質の凝灰岩が多くなる。所によっては比較的薄い安山岩を挟む。中央部には亜炭層を含み、かつては稼行されていた。珪化木を含むところもある。本累層は越前海岸大丹生から小丹生、鮎川にかけて広く露出する。本累層は保存良好な浅海性化石や植物化石を含む。

丹生層群の最上位を占める市ノ瀬累層は丹生山地の北端に狭小に分布するに過ぎない。本累層は市ノ瀬付近にもっとも広く分布する。そこでは、粗粒、塊状の凝灰岩層であり、新鮮なものは灰緑色を呈するが、風化すると白色化する。本累層は場所によって角礫質凝灰岩であったり、凝灰角礫岩であったりする。本累層の層序学的位置づけには問題を残している。

丹生層群全体は、東西ないし東北東の走向を持ち、北ないし北北西に緩く（20°程度）傾斜するが、越前海岸に沿っては、西に数10°傾斜したり、東に数10°傾斜したりする。丹生層群全体の層序学的層厚は2,000m近くあるが、堆積期間およびそれに引き続いて地盤傾動し、堆積の中心部が移動したことと、同時に場所によっては地盤上昇し、侵食が起こったので、基底部の埋没深度としてはせいぜい、1,000m前後であろう。

丹生山地の北部で丹生層群に貫入し、被覆する安山岩類がある（氏家・弘田, 1993）。これらは1,500万年程前の火山岩であり、丹生層群の堆積作用が終了した直後の火山活動の産物である。この安山岩の丹生層群に対する被覆量は不明である。

丹生層群の変質作用は著しく、場所によってはプロピライト化しており、グリーンタフと呼ばれることはよく知られているが、変成・変質の詳細については、あまり研究が進んでいない。塚野・三浦(1954)は、河野村甲斐城付近の糸生累層には斑晶状の外見をもち、最大3cmに達する濁沸石が存在し、それらはプロピライト化に関係あるとした。Utada(1970)は丹生層群中の火山ガラスなどが変質し、沸石や石英が晶出していることを示し、丹生層群が低度変質作用（埋没変成作用）を受けているとした。服部ら(1993)は、越前海岸玉川の崩落災害について地質学的に研究し、崩落地点の岩石には方沸石、濁沸石、輝沸石、東沸石、モルデン沸石が含まれていることを明らかにした。国見累層中には、中新統では珍しい層状チャートを含むことがある。東(1979)やHattori et al.(1996)はそれらを国見累層堆積直後の続成作用に関係しているとした。

## 研究方法

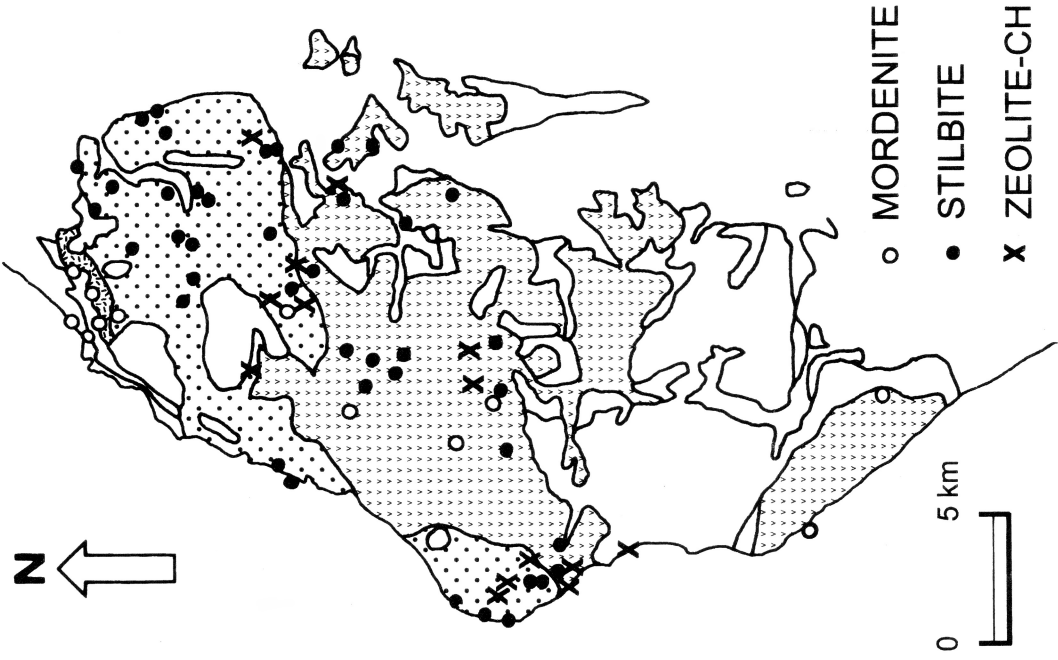
この研究では、丹生層群を構成する各種岩石の顕微鏡下での特徴およびそれらの変質状況を解析する。試料は丹生山地全体から広く、できるだけ偏りが無くなるように、約350の地点から、700個を越える試料を採取した（第2図）。採集した試料を顕微鏡観察すると同時に変質鉱物（特に沸石）についてはX線回折法で同定した。X線解析に供した試料の多くは全岩の粉末であるが、分離可能なサイズのものについてはその部分を取り出し、粉末にした。X線回折の条件は下記の通り。

Radiation : Cu, Filter :  $K\alpha$ , 40kV, 20mA, スキャン速度 1°/分,

チャート速度 10mm/分, Range 500 cps, 時定数 1秒, Slit : S1=1°, S2=0.15°, S3=1°.

X線回折データからの沸石類の同定は、Deer, Howei, and Zussman(1963)による「Rock-Forming Minerals, Vol. 4, Framework Silicate」に収録されている回折データおよび Borg and Smith(1969)の「Calculated X-ray Powder Patterns for Silicate Minerals」に集録されている回折データと比較することによって行った。

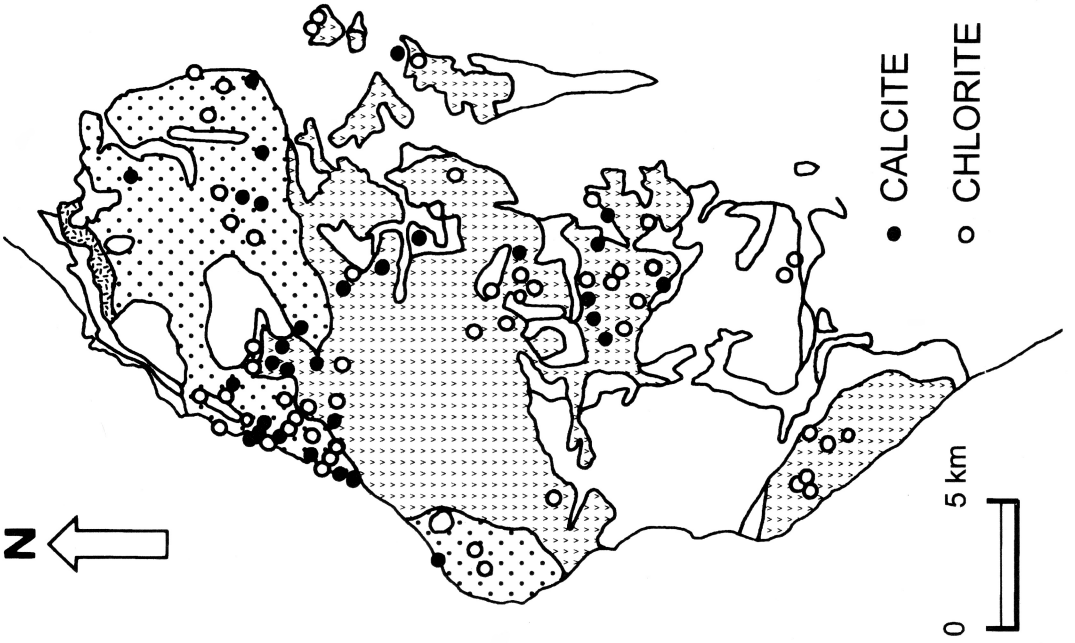
X線回折法により多くの沸石の同定が可能であるが、輝沸石 (heulandite) とクリノプチル沸石 (clinoptilolite) の区別は、さらに熱分析データを加味する必要がある。残念ながら、今回の研究では、熱分析データが得られていないので、Zeolite-CHとした。ここで言うZeolite-CHは、丹生山地の地史や地質環境を考慮すると、輝沸石である可能性が高い。なお、X線回折法では確認できなかったが、顕微鏡観察ではトムソン沸石 (thomsonite) の存在が確認できた。



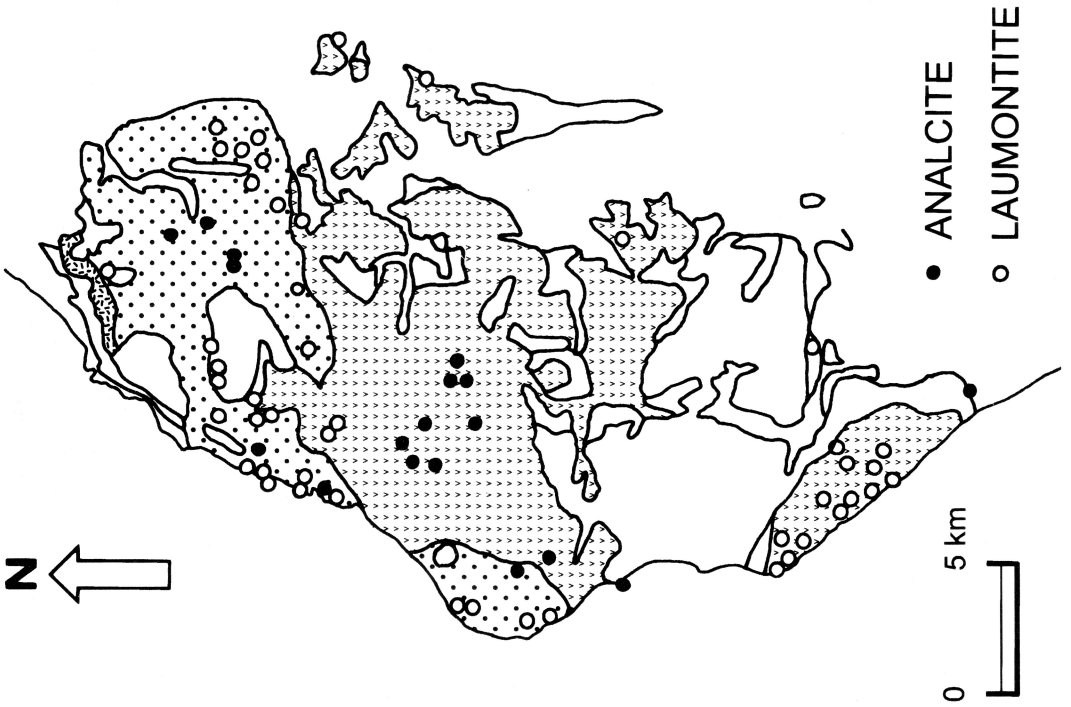
第3図：丹生山地におけるモルデン沸石、束沸石、およびZeolite-CHの分布。



第2図：変質・変成鉱物の研究のための試料採集地点。



第5図：丹生山地における方解石と緑泥石の分布



第4図：丹生山地における方沸石と濁沸石の分布

## 変質鉱物の顕微鏡下での産状

沸石類鉱物の産状として3つのタイプが認められる。1つは、斜長石、特に碎屑岩（凝灰岩を含む）中のサンドサイズの碎屑性鉱物として存在する斜長石を置換しているタイプであり（Plate 1-A）、第2のタイプはセメント物質として碎屑物の間の隙間を充填しているタイプである（Plate 1-B）。第3のタイプは、割れ目を充填する脈である。堆積岩中の沸石類は、第1、第2、第3のタイプとして出現するが、火山岩中の沸石類は第3のタイプ（脈鉱物としての沸石）が多い。火山岩中の斜長石はアルバイト化を受けたり、高温型から低温型へ移行したりするが、堆積岩中の碎屑性斜長石に比べて沸石化などの変質は受けていない（Plate 1-C）。礫岩の場合には、クラストを切る脈として出現したり、クラストを固定するセメント物質としても出現する。

第1のタイプは、様々な程度に斜長石を置換しているが、斜長石には累帯構造が残っていたり（Plate 1-D）、またその組成（ユニバーサルステージを用い対称消光角を測定し、Burri et al. (1967)のデータと比較して決めた）は、いくつかは高温型のオリゴクレスであったりラブラドライトであったりするが、An30からAn50までのアンデシンが圧倒的に多い。斜長石の双晶タイプ（twin law）としては、Albite 双晶、Carlsbad 双晶、およびAlbite-Carlsbad 双晶が多く、まれにAlbite-Ala 双晶、Baveno 双晶、あるいはPericline 双晶が認められる。

安山岩質岩石には輝石類が含まれているが、沸石は、石基の空隙を埋めていたり、斜長石を置換している場合はあるが、普通輝石（Augite）を置換している場合は見当たらなかった（Plate 2-A）。

方解石は斜長石を置換したり、碎屑物の間の空隙を充填したり（Plate 2-B）する。斜長石を置換する濁沸石をさらに置換する方解石も存在し（Plate 2-C）、方解石の形成には複数の段階があると思われる。

緑泥石は、主にガラス質凝灰岩によく発達する（Plate 2-D）。丹生層群も“グリーンタフ”のメンバーであるが、丹生山地ではそんなに多くの岩石は緑色ということではない。

緑簾石（Epidote）は主に国見累層中に散点的に確認される。糸生累層中には熱水性の緑簾石の脈が入っていることがある。

## 丹生山地における変質鉱物の分布

第2図に示すように、丹生山地のおおよそ350の地点から新第三系（丹生層群）岩石を採取した。X一線回折法により、方沸石、濁沸石、モルデン沸石、東沸石、Zeolite-CHの5種の沸石類の他に、方解石、緑泥石、緑簾石の存在が確認された。石英も同定されるが、堆積岩の場合、X一線回折法だけでは、自生鉱物なのか碎屑性鉱物なのか判定できないので、議論の対象から除外した。

第3図にモルデン沸石、東沸石、およびZeolite-CHの分布を、第4図に方沸石と濁沸石の分布を、第5図に方解石と緑泥石の分布を示す。

## 母岩の種類と変質鉱物の関係

沸石類の出現と母岩（堆積岩）の岩石種（碎屑性か火山性（凝灰岩質）か、粗粒堆積岩か細粒堆積岩か）との関係を調べた。国見累層から採取した岩石（試料数約600）を凝灰岩と碎屑岩および粒度によって分類し、X線回折法により沸石の存在が確認された試料の個数を数え、割合（%）を求めた（表1）。なお、この表に載せられている数値は、あくまでX線回折法で容易に沸石の存在の有無が確認できた個数と割合であって、顕微鏡観察で確認できる有無の割合などより少なくなっている可能性が高い。

この表から、砂岩より凝灰岩に、細粒の堆積岩より粗粒の堆積岩に沸石は多く含まれる傾向があることがわかる。礫岩の場合はクラストには含まれないが、基質には中粒砂岩と同じ程度に含まれている。堆積岩でも安山岩の岩片を多く含むものや安山岩質の凝灰岩（国見累層に多い）と流紋岩の破片を多く含むものや流紋岩質の凝灰岩（市ノ瀬累層に多い）とがある。この岩質とそこに含まれる沸石の種類との関係は次のようである：モルデン沸石、方沸石は流紋岩質凝灰岩など流紋岩質の堆積岩に、Zeolite-CHは安山岩質凝灰岩など安山岩質の堆積岩に多く出現する。束沸石と濁沸石は岩質による出現頻度の差はあまりない。なお、糸生累層の火山岩中の沸石類の多くは脈鉱物として産することが多く、また種類も多様である。

表1：堆積岩の種類および粒度と沸石類の有無の関係

岩石名	試料の数	沸石を含む試料の割合
粗粒凝灰岩	102	50%
中粒凝灰岩	60	47%
細粒凝灰岩	152	21%
凝灰角礫岩	93	41%
粗粒砂岩	64	31%
中粒砂岩	25	25%
細粒砂岩	14	14%
礫岩の基質	38	26%
泥岩	56	14%

## 変質鉱物の形成と続成作用

この研究では、第2図に示すように、丹生山地の広い範囲から試料を採取し、それに含まれる沸石鉱物や変質鉱物の種類を決めた。これらの鉱物は、場所によって頻度高く見つかるところと、見つからないところがあるが、全体的には、第3、4、5図に見るように、はっきりした分帯はできなかった。分帯がうまくいかない理由として、沸石を産状別に区別していないことが上げられるかも知れない。産状として、斜長石を置換する沸石、基質を埋める沸石、脈として存在する沸石があるが、それら、特に前2者を区別するためには、顕微鏡観察が不可欠である。しかしながら、今回は、X線回折法により沸石の有無を判定しているので、このことについての議論を深めることはできない。

分帯がうまくいかない理由のもう一つは、沸石形成環境の特殊性にあるかも知れない。Utada (1970) は丹生山地を含む北陸地域のグリーンタフ地域は、V-H (very high-temperature) タイプの変質作用を受けており、沸石帯上限・下限の埋没深度は非常に浅く、また、岩石の空隙率が大きいため、化学成分の移動も激しく、地温勾配が大きな地域（地熱地帯）に生成されたと推定した。

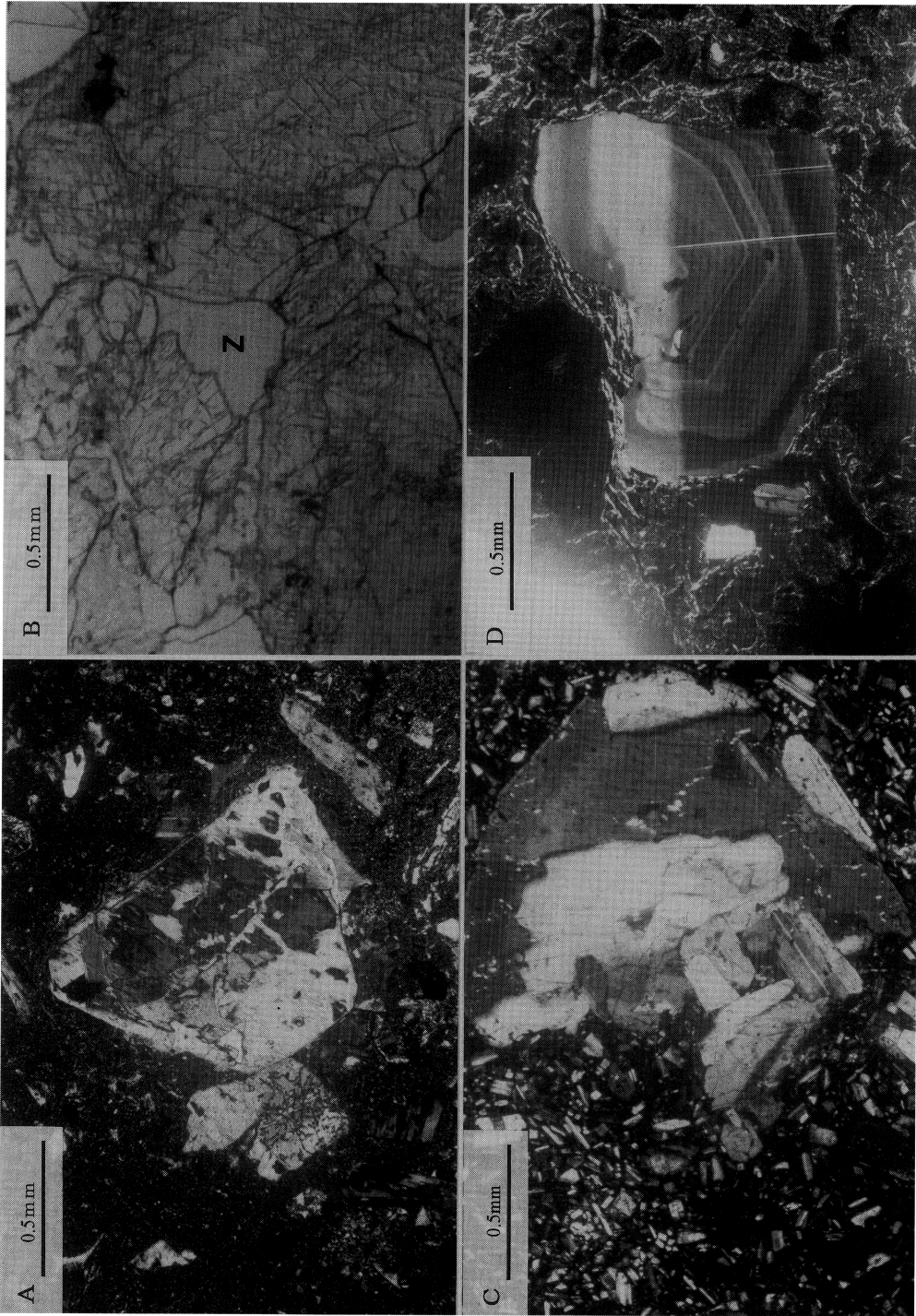


Plate 1 A : 中性斜長石を置換する沸石 (濁沸石).  
B : 粗粒碎層物の間の空隙を充填する沸石 (Z).  
C : 安山岩中の斜長石斑晶, アルバイト化している. 以前に沸石化されていたとは思われない.  
D : 累帯構造を残す高温型斜長石



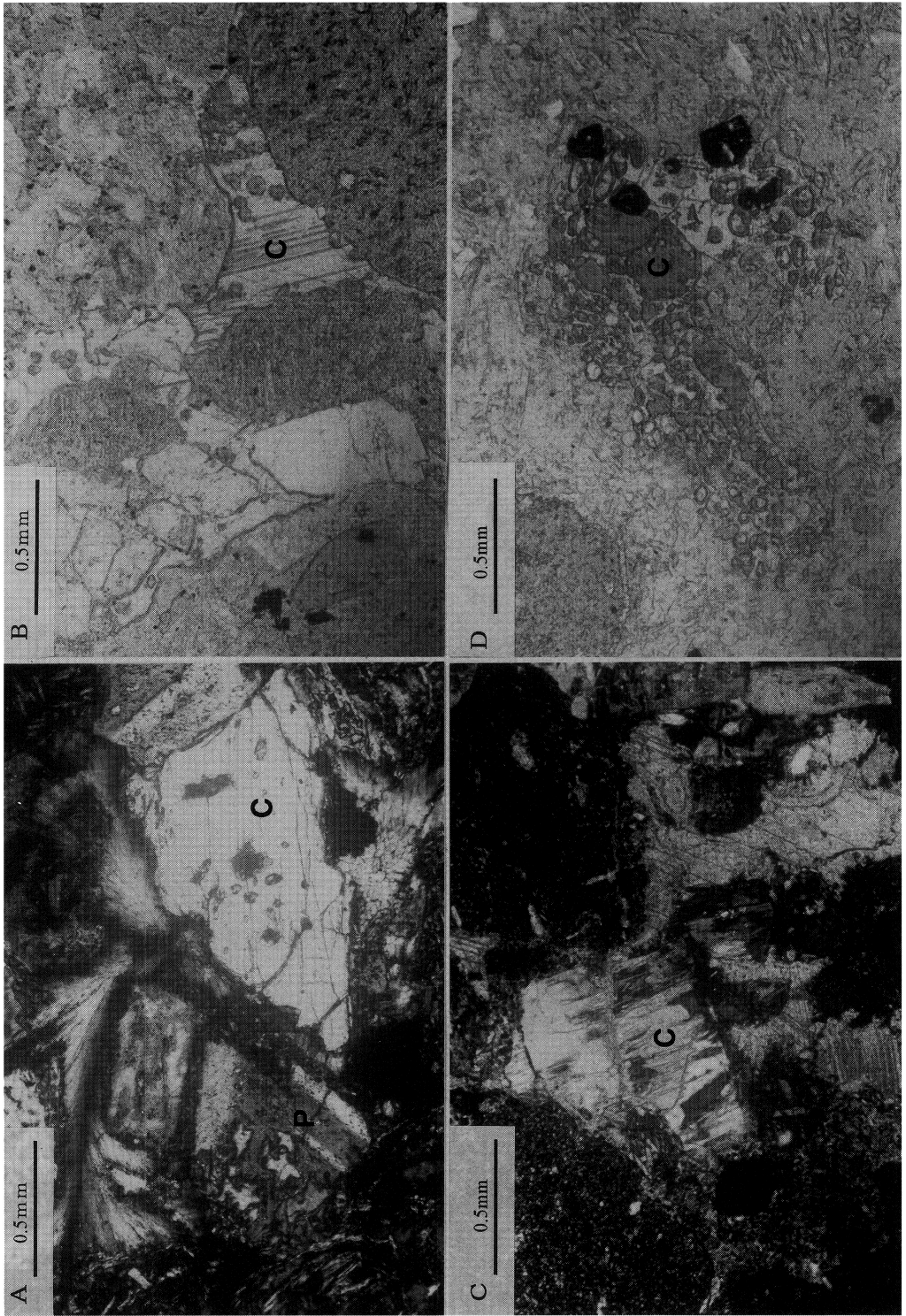


Plate 2 A : 沸石により置換されている斜長石 (P) と全く沸石に置換されない普通輝石 (C). B : 碎屑物の間を充填する方解石 (C).  
C : 斜長石を置換した沸石 (濁沸石) をさらに置き換える方解石 (C) D : 本地域の堆積岩や凝灰岩を緑色に見せる緑泥石 (C)



第3, 4, 5図は、丹生山地に出現する沸石の種類は、層準に支配されているというより、局所的な条件に支配されていることを示す。例えば、モルデン沸石は、丹生山地中央部と南部の糸生累層と市ノ瀬累層に出現するが、層序学的に中間に位置する国見累層には希にしか出現しない。束沸石、Zeolite-CH、方沸石および濁沸石は糸生累層と国見累層に広く分布するが、市ノ瀬累層には出現しない。同じ糸生累層においても、場所により濁沸石（南部に多い）と方沸石（丹生山地中央部に多い）の出現頻度に大きな差がある。また、方解石と緑泥石は糸生累層の中でも沸石を含まない地域（朝日町地域）には普遍的に見つかる。ここでは、沸石の代わりにアルバイトが出現するので、アルバイト帯程度の変成度にあるのかも知れない。このような出現状況、すなわち、分帯がうまくいかないという状況は、Utada(1970)の言うように、沸石帯の上限・下限が非常に狭く、見かけ上複数の沸石帯が混在しているのか、あるいは、沸石の累進反応速度以上に埋没速度が大きく、反応が不完全なまま埋没・変質が進展し、その後急激に剝削が起こり、反応が停止したため、複数の沸石類が混在している可能性もある。Utada(1970)の意見に従うにせよ、あるいは反応速度以上の埋没速度の考えを採用するにせよ、沸石類は丹生層群堆積と同時にあるいは直後には形成されたことを意味する（丹生山地全体が地熱地帯になったのは丹生層群堆積時である）。Hattori et al.(1996)は丹生山地国見累層に見つかった層状チャートの続成作用は非常に大きい速度で進展したと述べた。このことも上述の沸石形成に関する考え方と一致する。

顕微鏡観察によれば、沸石を多産する地域では、アンデシンが沸石に置換されている(Plates 1-A, 2-C)。一方、アルバイト帯の斜長石はアンデシンがアルバイト化したものであるが(Plate 1-C)、ここに至るまでに沸石により置換されていたとは思えない。すなわち、アルバイト帯の斜長石は沸石化を受けることなくアルバイト化している。このような事実は、埋没速度あるいは温度上昇速度が非常に速かったことを意味している。

結論的には、沸石分帯ができない理由として、前者（大きな地温勾配）も重要であるが、もっと本質的なのは、後者（急速な埋没・上昇）であろう。

本研究により、

1. 福井県丹生山地の第三紀層には広く続成作用から低度変成作用（変質作用）に起因する沸石が形成されている。
2. 沸石の産状には、斜長石を置換するもの、碎屑岩や凝灰岩中の空隙を埋めるもの、脈を形成するものがある。
3. 産出する沸石の種類は、母岩の岩質に依存していたり、局所的な条件に依存したりしている。
4. 沸石種による分帯は困難である。その理由の一つは、堆積後の地殻温度構造や堆積物の急激な埋没・隆起に関係していることが上げられる。

## 謝 辞

この論文は、福井大学の2名の卒業生、五十嵐(現姓梅田)尚美と宮越(現姓小寺)恵子の卒業研究をまとめ、一部データを追加し、修正を加えたものである。両名に深く感謝する。論文を公刊する

際、本学地学教室の山本博文博士、木下慶之君、および公刊する機会を提供していただいた福井市自然史博物館学芸員梅田美由紀氏にはたいへんお世話になった。記して謝辞とする。

## 文 献

- 東 洋一, 1979, 福井県丹生山地より産出する中期中新世のチャート. 地質学雑誌, 85, 59-66.
- Borg, I.Y., and Smith, D.K., 1969, Calculated X-ray Powder Patterns for Silicate Minerals. Geol. Soc. Am. Inc., Memoir 122, 896p.
- Burri, C., Parker, R. L., and Wenk, E., 1967, Die optische Orientierung der plagioklase. Birkhauser, Basel, 334p.
- Deer, W.A., Howei, R.A., and Zussman, J., 1963, Rock-Forming Minerals, Vol. 4, Framework Silicate. Longman, London, 435p.
- 福井県, 1982, 土地分類基本調査「鯖江・梅浦」, 53p.
- 服部 勇・福井卓雄・水谷伸治郎・大矢芳彦・山本博文, 1993, 越前海岸玉川崩落災害の地質学的側面—長周期過程と崩落の再来周期の推定—. 自然災害科学, 12, 125-139.
- Hattori, I., Umeda, M., Nakagawa, T., and Yamamoto, H., 1996, From chalcedonic chert to quartz chert: diagenesis of chert hosted in a Miocene volcanic-sedimentary succession, central Japan. Jour. Sediment. Research, 66, 163-174.
- 五十嵐尚美, 1978, 丹生山地の新第三系の続成作用. 福井大学地学教室 卒業研究報告書, 40p.
- 三浦 静, 1979, 北陸地方新第三系下部の火山層序について. 地質学論集, 16号, 149-155.
- 三浦 静・東 洋一, 1974, 北陸積成区における下部中新統に関する諸問題. 福井大学教育学部紀要 II, 自然科学, 24号, 15-25.
- 宮越恵子, 1979, 丹生山地南部の新第三紀層における続成作用および低度変成作用. 福井大学地学教室 卒業研究報告書 45p.
- 中島正志・沢田順弘・中川登美雄・林 昌代・板谷徹丸, 1990, 福井県北部新第三系のK-Ar年代と古地磁気—西南日本ブロックの回転に関して—. 岩鉱, 85, 45-59.
- Nakagawa, T., 1998, Miocene molluscan fauna and paleoenvironment in the Niu Mountains, Fukui Prefecture, central Japan. Sci. Rept. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, Sec. B, 61-185.
- Otofujii, Y. and Matsuda, T., 1983, Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. Earth Planet. Sci. Lett., 70, 373-382.
- 竹山憲市, 1989, 福井県の中新統国見累層より産出したシカ類化石. 福井県立博物館紀要, 第3号, 9-21.
- 友安由美子・梅田美由紀, 1985, 福井県越前海岸に見られる新第三紀層の堆積構造. 福井市立郷土自然科学博物館, 研究報告 32号, 9-30.
- 塚野善蔵・三浦 静, 1954, 福井県丹生山地の新第三系について. 福井大学学芸学部紀要 II, 自然科学, 4号, 1-10.
- 氏家 治・弘田貴巳, 1993, 福井市西部, 国見岳の中新世低カリウムソレアイトの化学組成. 岩鉱, 88, 379-389.
- Utada, M., 1970, Occurrence and distribution of authigenic zeolites in the Neogene pyroclastic rocks in Japan. Sci. Paper, Coll. Gen. Educ. Univ. Tokyo, 20, 191-262.
- 安野敏勝, 1997, 福井県越廼村の中新世哺乳動物足跡化石. 福井市自然史博物館研究報告, 第44号, 29-34.