

奥会津地熱地域・更新統砂子原層にみられる変質 —現在の地熱活動による湖成堆積物の変質—

関 陽児¹

Yoji SEKI (2000) Hydrothermal alteration of the Sunagohara Formation in the Okuaizu geothermal area, Japan -Alteration of lacustrine sediments formed by the present geothermal activity-. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51 (8), p.329-367, 24 figs, 7 tables, 1 appendix.

Abstract : Hydrothermal alteration of the Quaternary Sunagohara Formation was studied using bulk XRD techniques, bulk chemical analysis using XRF, NAA and ICP, and thin sections, and SEM observation. The Sunagohara Formation, which is composed of rhyolite lava domes and tuffaceous lacustrine sediments, is present at shallow depths in the Okuaizu geothermal system. The maximum depth of the lake sediments' base is about 350 m and maximum measured temperature is about 120 °C in the Sunagohara Formation.

Six alteration zones can be recognized based on the distribution of clays and zeolites: the least altered (LA) zone is characterized by fresh volcanic glass and found at the surface outside the Nishiyama spa and geothermal area. The smectite-zeolite (SZ) zone is found at the surface around the Nishiyama spa and shallow depths in the geothermal area. The SZ zone is characterized by smectite, clinoptilolite and mordenite. The mixed-layered clay mineral (ML) zone underlies the SZ zone and is also found at the surface of the Nishiyama spa. The ML zone is characterized by illite-smectite mixed-layered minerals and K-feldspar. The hydrothermal alteration is horizontally zoned around the center of the geothermal system, with the ML zone in the center, followed outward by the SZ and LA zones. The illite-chlorite (IC) zone is only found in drill holes of the geothermal area. The distributions of the SZ, ML and IC zones at depth can be correlated with increasing temperature. The kaolinite (K) zone is present at the surface around the northwestern end of Oisawa and several drill holes, and is characterized by abundant kaolinite. The K zone is thought to have been formed by interactions with near surface CO₂-rich acid water. The alunite (A) zone occurs in a limited surface area near the northwestern end of Sarukurazawa and is characterized by abundant alunite. The A zone is thought to have been formed by near surface sulfate-rich acid water.

The weight of the key components per unit volume for each alteration zone compared to the LA zone shows gains and losses for the following components. Gain of SiO₂, CaO and S, and loss of MnO, MgO for the SZ zone, gain of SiO₂, Fe₂O₃, K₂O, S, Au, As, Hg and Sb, and loss of MnO, MgO, CaO and Na₂O for the ML zone, gain of S, As and Sb, and loss of MnO, MgO, CaO, Na₂O and K₂O for the K zone. No significant changes of Al₂O₃ and TiO₂ is recognized for all alteration zones. The behavior of these components can be correlated according to the following observation on minerals in this area: a) addition of hydrothermal quartz and argillization of mafic minerals in the SZ and ML zones, b) decomposition of plagioclase in the ML zone, c) replacement of volcanic glass to zeolite and K-feldspar in the SZ and ML zones, respectively, d) precipitation of pyrite and arsenic sulfide in the ML zone, and e) replacement of volcanic glass and plagioclase to kaolinite and alunite in the K and A zones, respectively.

要 旨

奥会津地熱地域に分布する地層群の中で、唯一、現在と一連の地熱活動による変質のみを記録すると考えられ

る砂子原層を対象として、奥会津地熱系の地表付近における変質作用の実態を明らかにした。変質露頭の野外観察、および地表と坑井から採取した約200個の岩石試料を用いた粉末 X 線回折法による変質鉱物の同定、光学顕微鏡および走査電子顕微鏡による変質鉱物の観察、蛍光 X

¹ 資源エネルギー地質部 (Mineral and Fuel Resources Department, GSJ)

Keywords : Okuaizu geothermal system, Sunagohara Formation, Hydrothermal alteration, Geochemistry

線分析・中性子放射化分析・誘導結合プラズマ発光分析等による主成分・微量成分の化学分析を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 砂子原層の変質は、特徴的に認められる変質鉱物の組合せにより、以下の6帯に分帯される。I：火山ガラスの多くが非変質のまま残存する弱変質(LA)帯, II：スメクタイト, モルデン沸石, 斜プチロル沸石のいずれかを多量に含むスメクタイト・沸石(SZ)帯, III：カリ長石およびイライト/スメクタイト混合層粘土鉱物で特徴づけられる混合層粘土鉱物(ML)帯, IV：イライトおよび緑泥石で特徴づけられるイライト・緑泥石(IC)帯, V：多量のカオリナイトを含むカオリナイト(K)帯, VI：明ばん石およびクリストバライトで特徴づけられる明ばん石(A)帯。

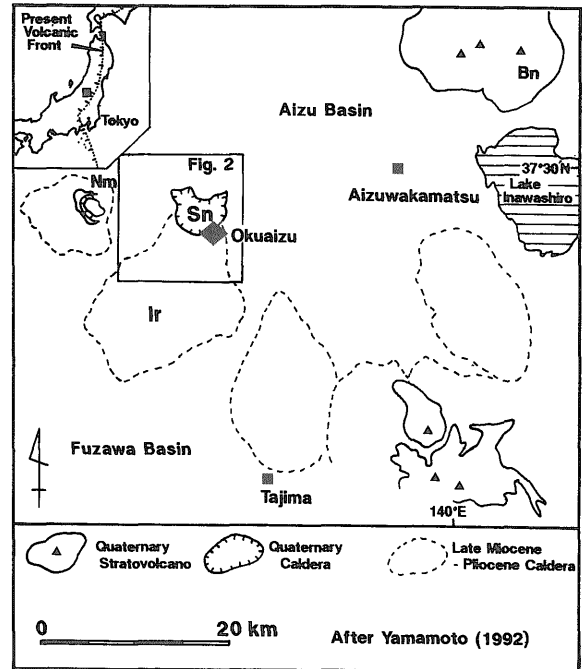
(2) 地熱活動の中心地域の地下にIC帯が、その上部にML帯が、その周辺の地表にSZ帯が、さらにそれを取りまいてLA帯が累帯配列する。K帯とA帯は、ML帯とSZ帯の分布を切って局所的に出現する。

(3) LA帯を基準とした各変質帯における化学成分量の出入りは、以下のとおりである。SZ帯ではSiO₂, CaO, Sの付加およびMnO, MgOの除去, ML帯ではSiO₂, Fe₂O₃, K₂O, S, Au, As, Hg, Sbの付加およびMnO, MgO, CaO, Na₂Oの除去, K帯ではS, As, Sbの付加およびMnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂Oの除去。これらの化学成分の出入りは、変質鉱物の分布と以下のように対応づけられる。SZ帯とML帯における熱水性石英の付加・有色鉱物の粘土鉱物化, 火山ガラスのSZ帯における沸石化とML帯におけるカリ長石化, ML帯における斜長石の粘土鉱物化・カリ長石化および黄鉄鉱や浅熱水性元素群に富む硫化物の沈殿, 火山ガラスや斜長石のK帯におけるカオリナイト化・A帯における明ばん石化。

(4) これらの変質帯の多様性や空間分布の特徴は、砂子原層の地形, 原岩の特徴, 地下の温度分布や水理・地質構造, 地熱流体の化学的特徴などと以下のように関連づけられる。SZ帯からML帯を経てIC帯に至る累帯配列するアルカリ性～中性pHの変質帯については、主として滝谷川断層を上昇してきた中性熱水が、透水性の高い湖成碎屑岩中を水平方向に温度低下しつつ拡散することにより、西山温泉を中心とする広範囲に形成された。フラクチャーに規制されて分布するK帯とA帯は、それぞれ沸騰により生じたCO₂ガスに飽和した酸性地下水, およびH₂Sガスの酸化で生じた硫酸酸性水により、沸騰箇所近傍に局在して形成された。変質鉱物から示唆される温度は、現在の地下の実測温度よりも数10°C高い。

1. はじめに

会津盆地の南西縁, 福島県河沼郡柳津町西山地域に位置する奥会津地熱地域(第1図)では、電気出力65000kW



第1図 位置図。Nm：沼沢火山, Sn：砂子原カルデラ, Ir：入山沢カルデラ, Bn：磐梯火山。地質は山元(1992)による。Fig. 1 Regional location map (after Yamamoto, 1992). Sn: Sunagohara caldera, Ir: Iriyamazawa caldera, Nm: Numazawa volcano and Bn: Bandai volcano.

の柳津西山地熱発電所の運転開始に至る地熱資源の探査・開発の過程で40本以上の坑井が掘削され(大賀, 1992; 新田・他, 1995), それらの坑井から得られた資試料に基づく同地熱地域の層序と変質に関する概括的な知見が関・安達(1997)によりまとめられた。また、地表の岩石の変質については、粘土鉱床近傍を対象とした調査(谷田・他, 1963), 会津地方の広域調査(早川・他, 1977), 地熱系の予察的な調査(通産省, 1978)などがなされている。これらの調査報告によれば、奥会津地熱地域に分布する岩石の多くは、現在の地熱活動による変質のみならず、中新世のいわゆるグリーンタフ変質やカルデラ地熱変質などを重複して被っていると考えられている。その中であって、第四系砂子原層は生成年代が約30万年前以降と新しく、かつ地熱系の直上部に位置することから、そこに見られる変質は約30万年前以降から現在に至る地熱活動によってもたらされたことは明らかである。

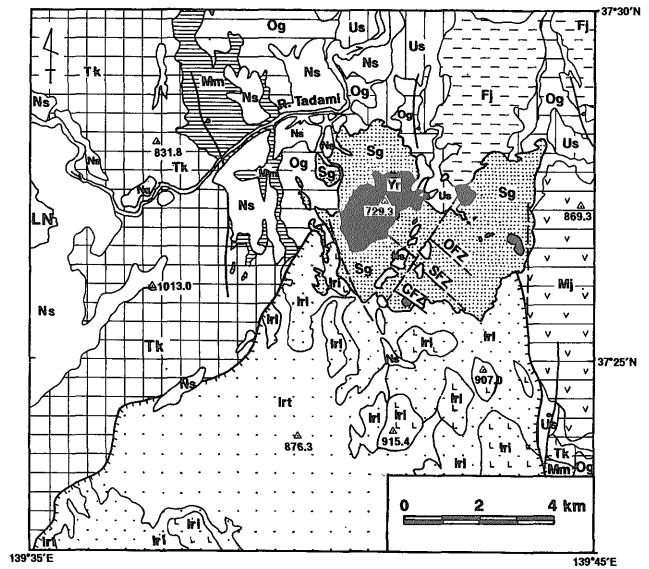
そこで本研究では、砂子原層の熱水変質の解析により奥会津地熱地域における過去数十万年以内の地熱活動の実態を明らかにすることを試みた。用いた手法は、野外調査による変質露頭の観察, 粉末X線回折法による変質鉱物の同定, 光学顕微鏡・走査電子顕微鏡による変質鉱物の観察および蛍光X線分析(XRF)・中性子放射化分析(NAA)・誘導結合プラズマ発光分析法(ICP)等による変質岩の主成分・微量成分の化学分析である。

2. 地熱系の概要

奥会津地熱系は会津盆地南縁の山岳地域に位置する。同地域には、先第三系の堆積岩類および花こう岩類を基盤として、前期-中期中新世の海成および一部非海成碎屑岩と火山岩 (鈴木・吉田, 1956; 北村・他, 1968; 通産省, 1970; 鈴木・他, 1986), および後期中新世-鮮新世のカルデラ火山環境下で形成された堆積岩・火山岩 (山元, 1992) が分布する (第2図)。

奥会津地熱地域の層序は、下位より、砂岩と安山岩からなる下部中新統大檜沢層、流紋岩と同質火山碎屑岩からなる下部中新統滝沢川層、流紋岩質火山碎屑岩を主とし泥岩を伴う中部中新統荻野層、流紋岩質火山碎屑岩、砂岩、泥岩などからなる中部中新統漆窪層、デイサイト質火山碎屑岩を主とし岩屑なだれ堆積物を伴う上部中新統入山沢層、流紋岩、同質火山碎屑岩、砂岩、泥岩などからなり分布の縁辺に不淘汰角礫岩を伴う更新統砂子原層からなる (小室, 1978; NEDO, 1985; 新田・他, 1987; 水垣, 1993; 関・安達, 1997; 第3図)。

地熱流体は、地表下500m前後に分布する粘土化変質による難透水帯により効果的にシールされ、主として滝沢川層と大檜沢層中に発達する血の池沢、猿倉沢の両フラクチャーゾーン中の急傾斜開放裂か中に貯留される。地



第2図 広域地質図(NEDO(1985), 山元(1992), 水垣(1993)より編図)。OFZ: 老沢フラクチャーゾーン, SFZ: 猿倉沢フラクチャーゾーン, CFZ: 血の池沢フラクチャーゾーン, LN: 沼沢沼。その他の略号は、第3図に示す。

Fig. 2 Geologic map of Okuaizu and surrounding area (compiled from NEDO, 1985; Yamamoto, 1992 and Mizugaki, 1993). OFZ: Oisawa fracture zone, SFZ: Sarukurazawa fracture zone, CFZ: Chinoikezawa fracture zone and LN: Lake Numazawa. The other abbreviations are shown in Fig. 3.

Geologic Age	Stratigraphy	Lithology	Thick. m
0.01	Ns Numasawa	Ns Dacitic ash flow tf. and scoria	
1	Sg Sunagohara Yr Yunotake	Sg upper: Rhyolitic ash flow	>50
		middle: Mst, sst. and slst.	100
		lower: fine tf. and poorly sorted basal brecc.	>90
5	Fj Fujitohge Ir Iriyamazawa	Fj Sst., alt. of sst. and mst., pm. tf. and cgl.	300
		Ir Irt: Dacitic ash flow tf. and debris avalanche deposit	>1000
10	Us Urushikubo	Irl: Sst., slst. and cgl.	>200
		Iri: Dec., rhy. and and. lava and intrusion	
15	Og Ogino Mj Myojingatake Mm Miyashita	Us Sst., slst., mst., cgl., tf. brecc., pm. tf., basaltic pyroclastics and rhy. lava	200-600
		Mj Andesitic to basaltic pyroclastics	300
		Og Rhyolitic pyroclastics and lava intercalating mst.	200
		Mm Mst.	-500
20	Tk Takizawagawa Oh Ohizawa	Tk Rhyolitic pyroclastics and lava	1000-1300
		Oh And. lava, lap. tf. and sst.	>600

第3図 層序・岩相図 (NEDO (1985), 鈴木・他 (1986), 山元 (1992), 水垣 (1993) より編図)。

Fig. 3 Stratigraphy and lithology of the Okuaizu area (after NEDO, 1985; Suzuki et al., 1986; Yamamoto, 1992 and Mizugaki, 1993).

熱流体の一部はその難透水帯を通り抜けて地表に達し、西山温泉、荒湯、神の湯などで温泉水として湧出する(新田・他, 1987; Seki, 1991)。貯留槽中の地熱流体の実測最高温度は340°C以上(新田・他, 1995)、全溶存成分濃度は約2 wt%, CO₂濃度は約1 wt%, H₂S濃度は約200 mg/kgであり(Seki, 1990)、高温・高塩濃度・高ガス濃度の特徴をもつ(関, 1996)ほか、地熱流体からの金銀を含む硫化物スケールの沈殿も知られている(新田・他, 1991)。

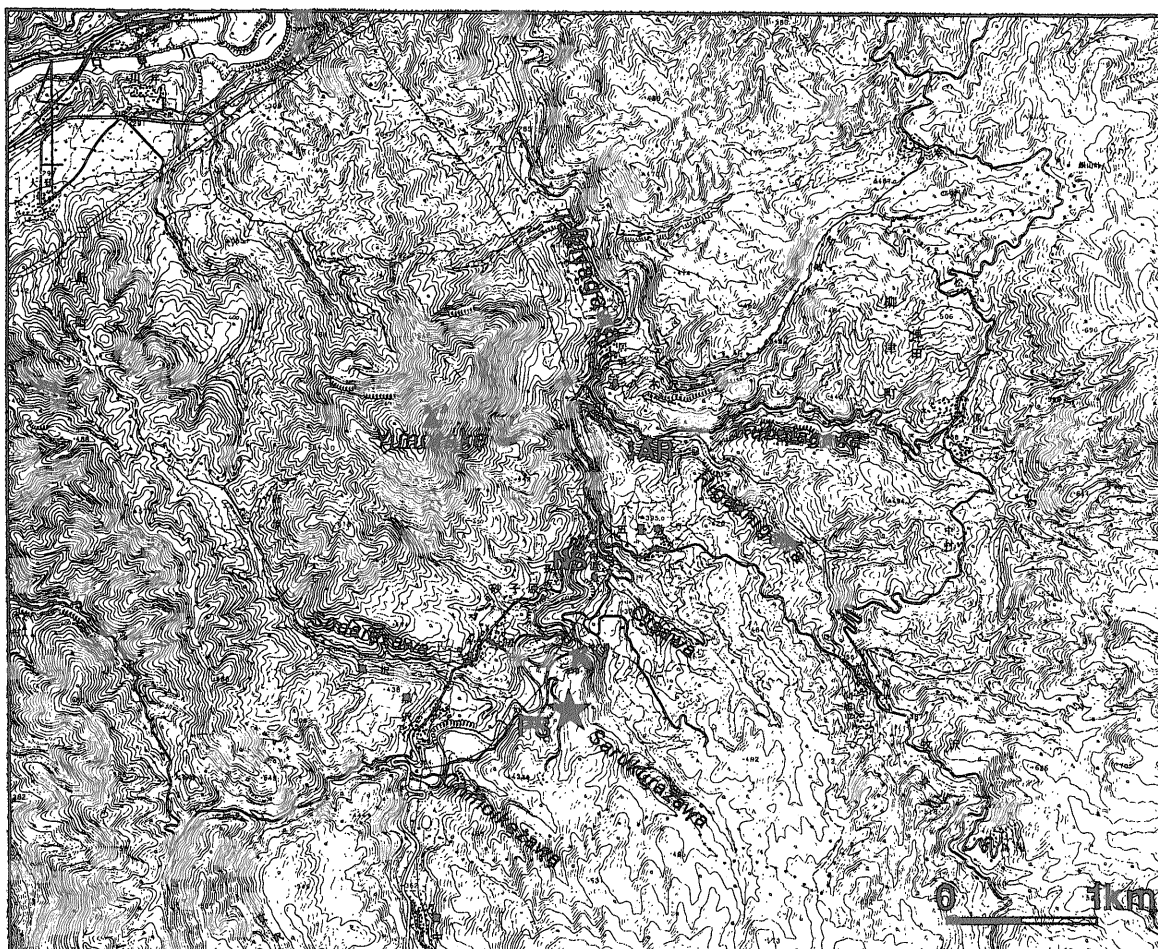
3. 砂子原層の概要

更新統砂子原層は、中央がくびれた径約5 kmの多角形の砂子原カルデラを埋積して分布する。分布の西部に位置する湯の岳山頂(標高729m)を最高点とし、分布の東側と南側の境界は標高500~600mで中新統からなる山体に接する。分布の西側境界は標高500m強の本層が分水嶺

をなす。分布域内の最高次河川は中央やや西側を北流する滝谷川であり、河床面標高は280~330mである。滝谷川沿いの標高350m付近と滝谷川の支流に沿う380m, 430m付近には平坦面が認められる。このうち350m面の地表付近には約5000年前に噴出した沼沢火砕流(山元, 1995)が堆積する。他の2面は砂子原層の湖成層が形成する(第4, 5図)。

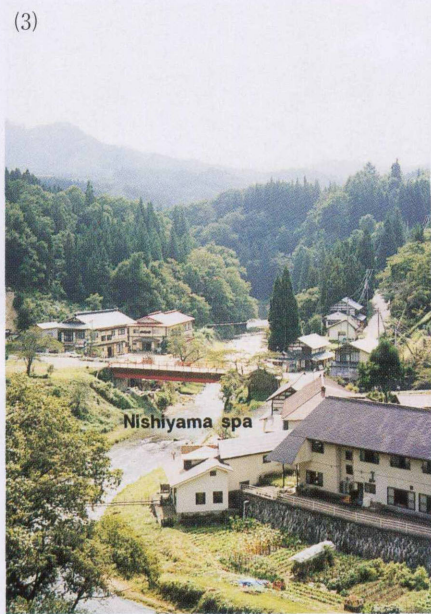
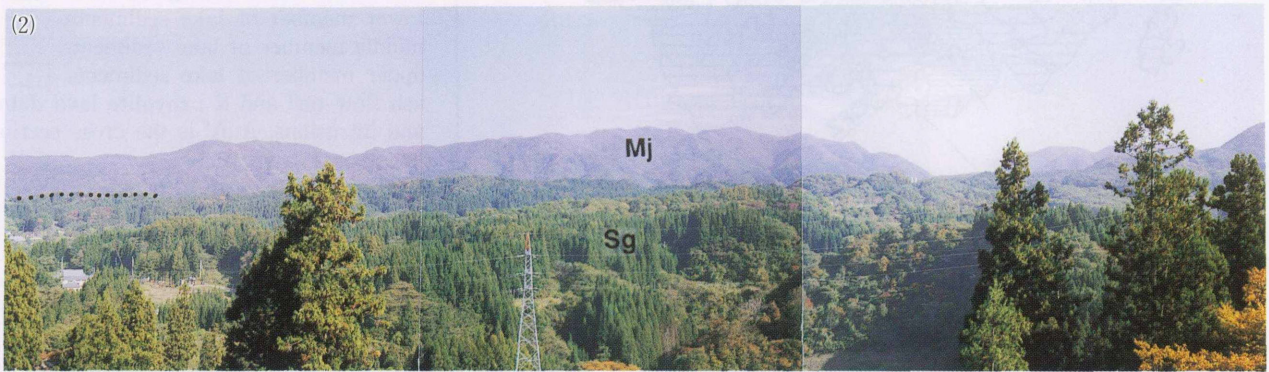
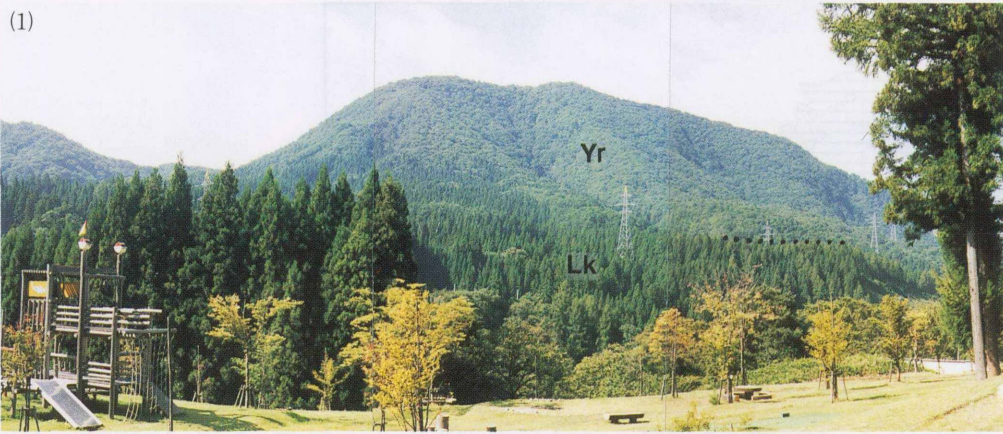
砂子原層は、流紋岩・同質火砕岩、凝灰岩、凝灰質砂岩・シルト岩・泥岩、不淘汰角レキ岩からなり、それぞれ流紋岩質カルデラ火山活動に伴って形成された溶岩・火砕流堆積物、降下堆積物、湖成層、崖錐堆積物ないし基底礫岩と考えられている(水垣, 1993)。下位層とは不整合関係にあり、分布の縁辺では不淘汰角レキ岩をもって下位層に高角度でアバットする(小室, 1978)。

水垣(1993)によれば、砂子原層の湖成層は下部層、中部層、上部層の3部層に区分され、全層厚は約400mである(第6図)。下部層は、灰色の細粒凝灰岩を主体とし、



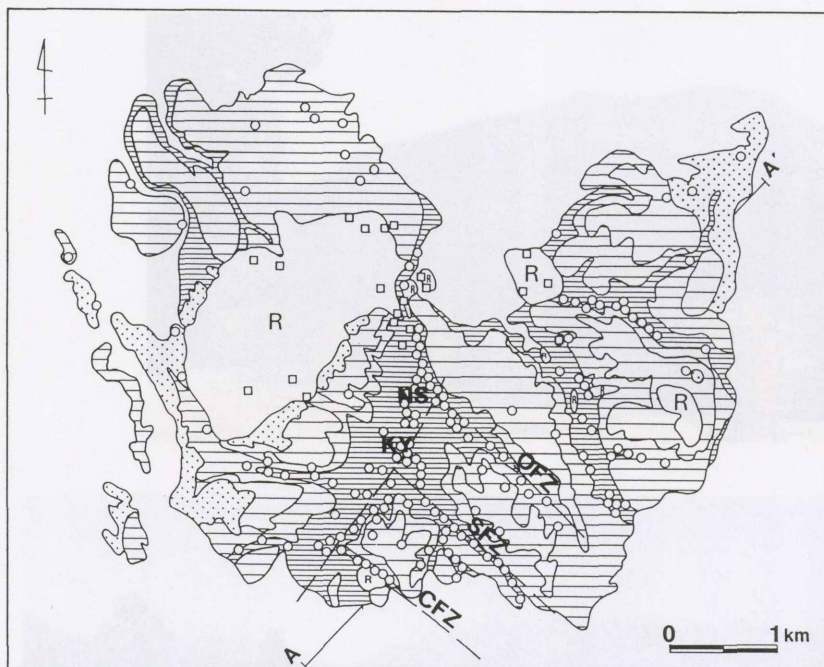
第4図 奥会津地域の地形図(国土地理院発行1:25000地形図「宮下」(新潟8号-1)を使用)。点線は砂子原層の分布境界, PS: 西山柳津地熱発電所, AR: 荒湯温泉, NS: 西山温泉, KM: 神の湯温泉。図の範囲は第6, 9, 10, 12, 18, 19, 21および23図と同じ。

Fig. 4 Topographic map of the Okuaizu area. Dots show the surface distribution of the Sunagohara Formation. PS: Yanaizu-Nishiyama geothermal power station, AR: Arayu hot spring, NS: Nishiyama spa and KM: Kaminoyu hot spring. This map shows the same area as in Figs. 6, 9, 10, 12, 18, 19, 21 and 23.



第5図 砂子原層分布域の地形写真。(1) 湯の岳流紋岩：湯の岳流紋岩が形成するドーム地形(Yr)とその脚部以下に分布する砂子原層湖成層(Lk)。西山温泉南方の滝谷川東岸、沼沢火砕流堆積物平坦面上の西山森林公園から北西向きに撮影。(2) 砂子原層湖成層と砂子原カルデラのカルデラ壁：砂子原カルデラ内部を埋積する砂子原層湖成層(Sg)が形成する緩傾斜平坦面と明神ヶ岳安山岩(Mj)からなる東側カルデラ壁。西山温泉西側の滝谷川西岸、沼沢火砕流堆積物平坦面上から東向きに撮影。(3) 西山温泉集落を流下する滝谷川：河床沿いに源泉が点在する。西山温泉南の県道より北向きに撮影。(4) 長坂付近の滝谷川左岸攻撃斜面：比高30-40mの急斜面の主部は砂子原層湖成層下部層からなる。神の湯北方の尾根上から西向きに撮影。

Fig. 5 Geomorphology formed in the Sunagohara Formation. (1) Yunotake Rhyolite dome (Yr) and lake sediment (Lk). (2) Gently-dipping low-relief plane formed in the lake sediments of the Sunagohara Formation (Sg) and caldera wall formed by Miocene Myojingatake Andesite (Mj). (3) River Takiya-gawa in the Nishiyama spa. (4) A 30-40 m high steep slope formed by the River Takiya-gawa near Nagasaka.



第6図 砂子原層地質図(水垣(1993)による)。無地：流紋岩溶岩， $\square \cdot \cdot \cdot$ ：火砕流堆積物， \equiv ：湖成層下部層， \equiv ：湖成層中部層， \equiv ：湖成層上部層，A-A'：第8図に示す断面線。

Fig. 6 Geologic map of the Sunagohara Formation (after Mizugaki, 1993). \equiv : lower member of lake sediments, \equiv : middle member of lake sediments, \equiv : upper member of lake sediments, $\square \cdot \cdot \cdot$: ash flow tuff and R : rhyolite lava dome and intrusions. A-A' is the cross-section line shown in Fig. 8.



第7図 砂子原層湖成層下部層の代表的な岩相。(1) 凝灰質泥岩・凝灰岩細互層 (2) 軽石凝灰岩 (3) 礫混じり凝灰岩 (4) 流紋岩礫を含む凝灰岩。

Fig. 7 Typical lithology in the lower member of lake sediments in the Sunagohara Formation. (1) Thinly-alternated tuffaceous mudstone and fine tuff, (2) Pumiceous tuff, (3) Sandy tuff including pebbles and (4) Sandy tuff including rhyolite cobbles.

礫質凝灰岩を含み(第7図), 分布縁辺には基盤岩の小礫ないし巨礫を多量に含む不淘汰角礫岩がみられる。層厚は250m以上に達し, 湖成層の主体をなす。中部層は, 淡褐色ないし白色の砂岩ないしシルト岩を主とし, 全体に厚さ1-10cmの層理が発達している。粗粒砂岩には金色の黒雲母片および軽石片を多量に含み, 細粒の碎屑物はほとんど火山ガラス片からなる。層厚は約50mである。上部層は, 泥岩, 礫質泥岩, 砂岩礫岩互層などからなり岩相変化が激しく, 下部層および中部層に比べ火山源碎屑物が少ない。西山温泉北方では中部層を削り込んで分布し, 層厚は最大100mである。

湯の岳は砂子原層湖成層に貫入した長径約2km, 比高約300mのパーライト質黒雲母角閃石流紋岩のドームからなる。この流紋岩ドームは湯の岳流紋岩(NEDO, 1985)とよばれる。より小規模な同質流紋岩体は砂子原層分布域内の数カ所でみられる。

坑井データに基づく砂子原層基底面の形状(水垣, 1993; 関・安達, 1997)は, 相対的に小さな中心火道をもち浅部で側方に大きく広がる, じょうご型を呈する。じょうご構造の内部はほぼ水平に堆積した流紋岩質火山碎屑岩と湖成層で埋積される(第8図)。カルデラ内には数カ所で流紋岩の溶岩ドームが噴出, あるいは浅所貫入しているが, それらの分布はカルデラの中心から2km前後離れている。

砂子原層の年代としては, 湯の岳流紋岩が20-30万年前(NEDO (1982)の測年値に基づく水垣(1993)), カルデラ形成期のテフラが30万年前(山元, 1992, 1996)と考えられている。

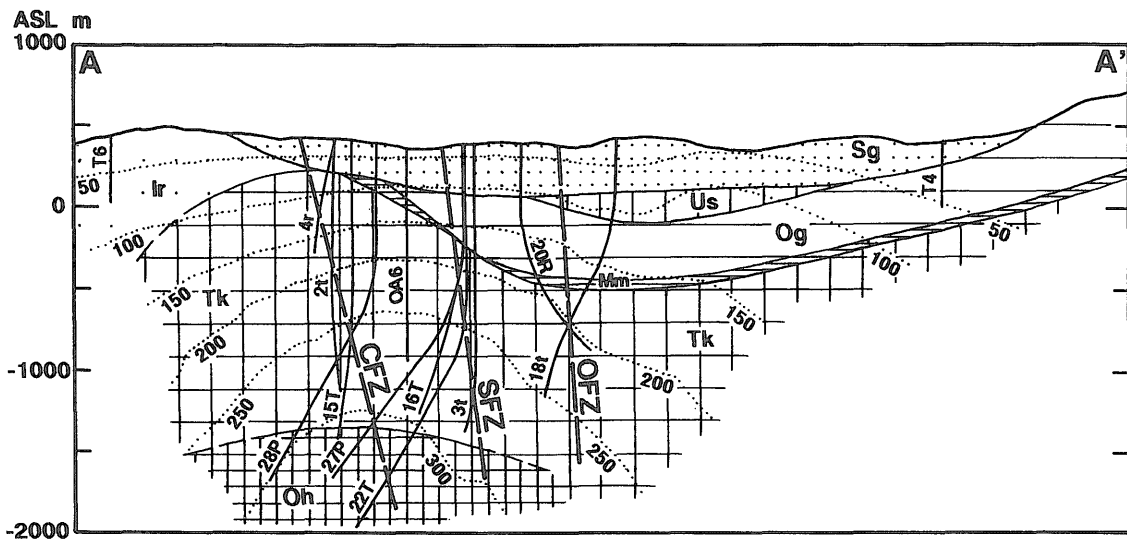
4. 砂子原層にみられる変質

4.1 試料および変質鉱物の同定法

砂子原層分布域内の約30km²の範囲の地表から採取した約150個の岩石試料, および坑井から採取した約50個のカッチングス試料を検討した。試料の採取地点を第9図に示す。試料の約90%は湖成層中の凝灰岩, 凝灰質砂岩・シルト岩・泥岩, 軽石質凝灰岩であり, 残りは湯の岳流紋岩およびほぼ同時期に砂子原層湖成層に浅所貫入した流紋岩である(第1表)。

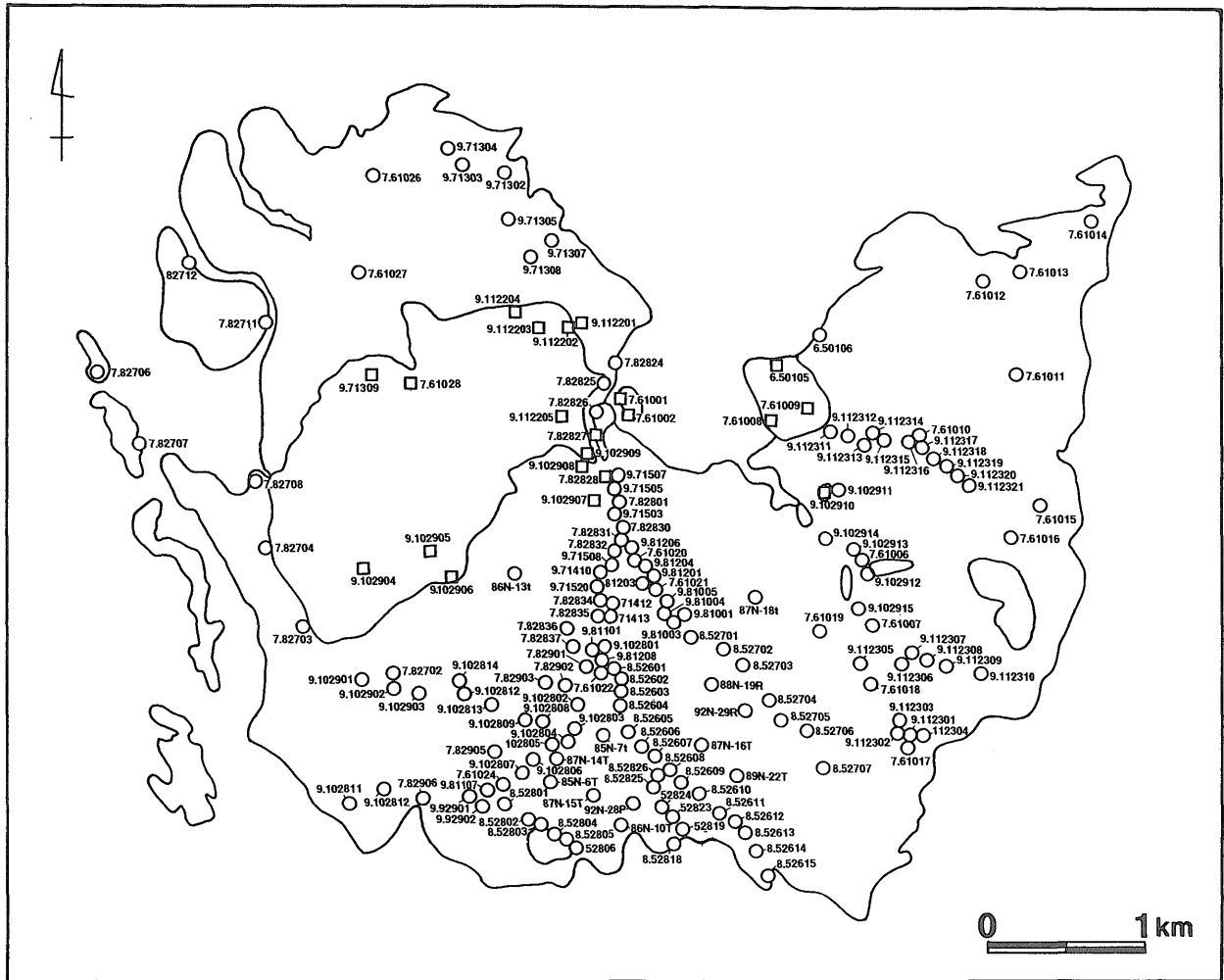
変質鉱物の同定は, メノウ乳鉢で磨砕した全岩粉末をスライドグラスに塗りつけた半定方位試料を用いた粉末X線回折により行った。代表的な試料については鏡下観察および水ヒにより得た粘土画分の定方位試料のX線回折を行った。X線回折は理学製ロータフレックスRAD- γ Aを用い, 測定条件はCu-K α , 出力40kV-100mA, スリット系1°-1°-0.3mm, 走査速度毎分8°, 時定数0.1秒とした。粘土鉱物の判定に際しては, スメクタイトと混合層鉱物はエチレングリコール処理(定方位試料にEG10%溶液を添加)でのピーク移動により, 緑泥石は塩酸処理(1N-HCl中に60°C-2時間)でのピーク崩壊により, それぞれ確認した。X線回折チャートの5°から10°および20°から30°の間に極めてブロードなピークが現れた場合は, 非晶質物質とみなした。

また, 後述する変質帯ごとに数個の代表的試料を選び, 自然乾燥状態での密度を測定した。密度計算のための体積測定は, 約10cm³の不定形試料を用い水置換法により行った。



第8図 奥会津地熱系断面図(関・安達(1997)による)。略号は第2, 3図と同じ。

Fig. 8 Geologic cross-section of the Okuaizu geothermal area (after Seki and Adachi, 1997). Abbreviations are the same as in Figs. 2 and 3.



第9図 X線回折試料採取地点。
Fig. 9 Locations of samples for XRD.

第1表 分析法。XRF：蛍光X線分析，Infrared：赤外吸収分析，NAA：中性子放射
 化分析，ICP：誘導結合プラズマ発光分光分析。
 Table 1 Analytical method.

成分	分析法	検出限界	成分	分析法	検出限界	成分	分析法	検出限界
SiO ₂	XRF	0.010%	As	NAA	0.5 ppm	Ta	ICP	0.5 ppm
Al ₂ O ₃		0.010%	Au		2 ppb	Th		0.2 ppm
Fe ₂ O ₃		0.010%	Ba		50 ppm	Y		2 ppm
MnO		0.010%	Co		1 ppm	Ag		0.5 ppm
MgO		0.010%	Cs		1 ppm	Bi		5 ppm
CaO		0.010%	Cr		5 ppm	Cd		0.5 ppm
Na ₂ O		0.010%	Hf		1 ppm	Cu		1 ppm
K ₂ O		0.010%	Hg		1 ppm	Mo		2 ppm
TiO ₂		0.005%	Rb		15 ppm	Ni		1 ppm
P ₂ O ₅		0.010%	Sb		0.1 ppm	Pb		5 ppm
LOI	Infrared	0.010%	Sc	0.1 ppm	Zn	1 ppm		
S		0.010%	Se	3 ppm	V	2 ppm		
			Sr	1 ppm				

4.2 変質帯

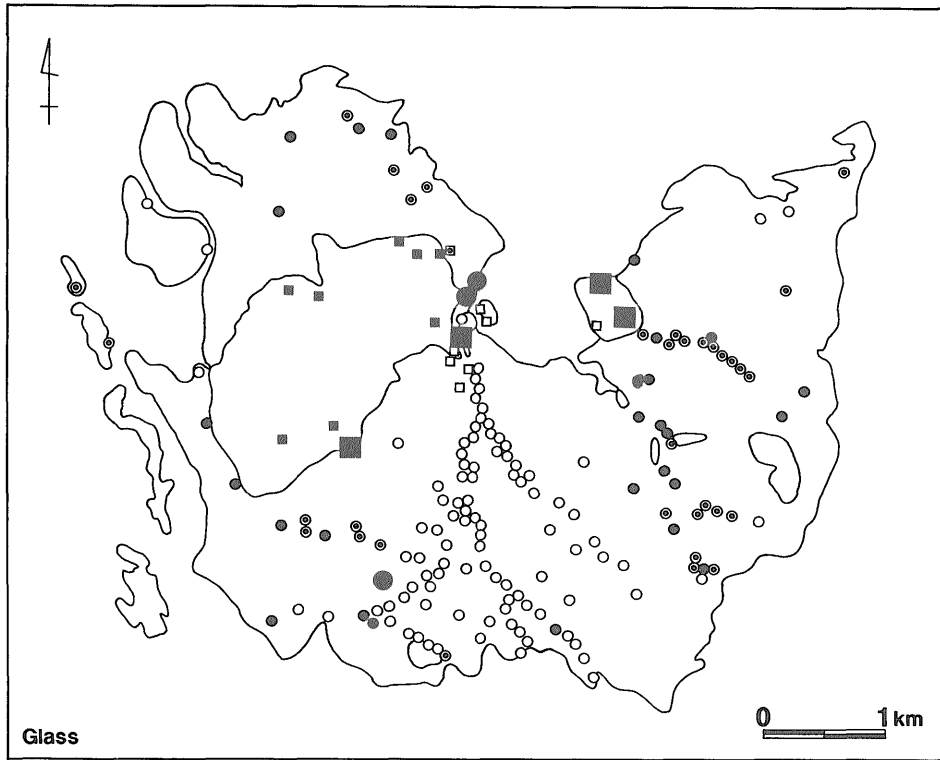
全岩粉末試料のX線回折により同定された鉱物を巻末資料に、主な鉱物の分布を第10図に、それぞれ示す。地表および坑井から採取した砂子原層の岩石試料から同定

された鉱物は以下のとおりである。

シリカ鉱物：石英，クリストバライト

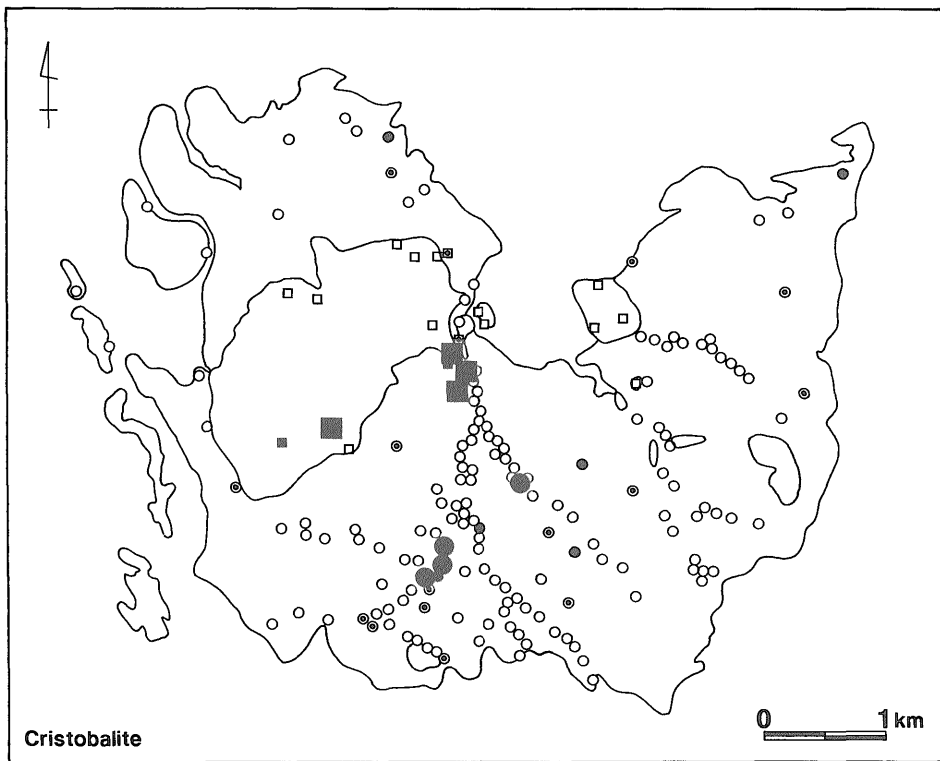
長石鉱物：斜長石，カリ長石

粘土鉱物：スメクタイト，イライト，イライト/スメク

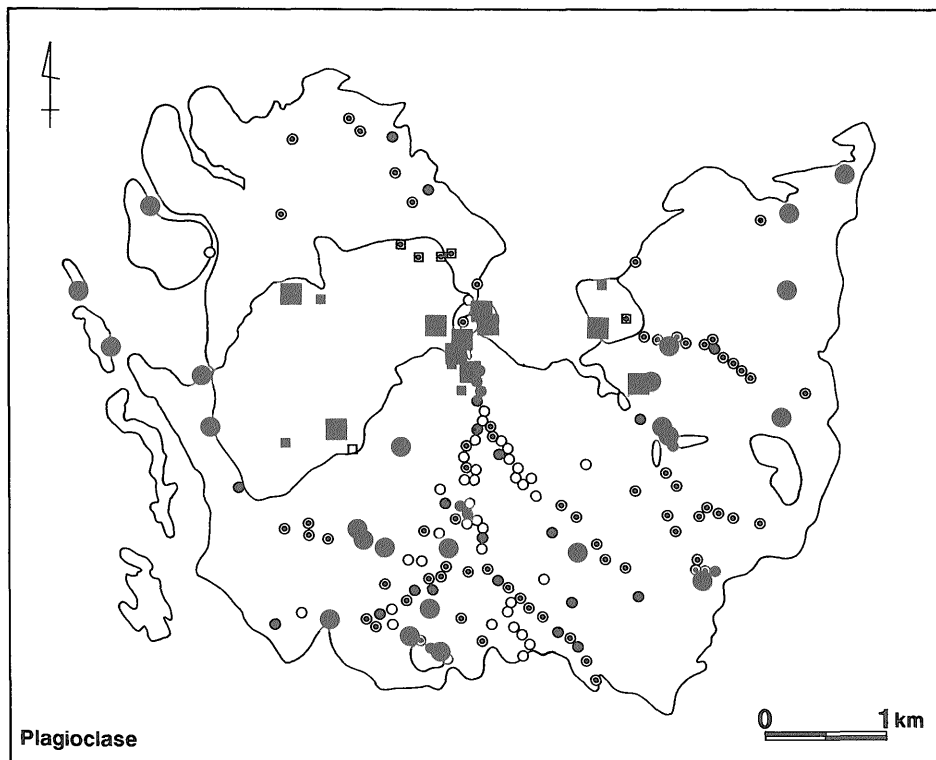


第10図-1 ガラス.
Fig. 10-1 glass.

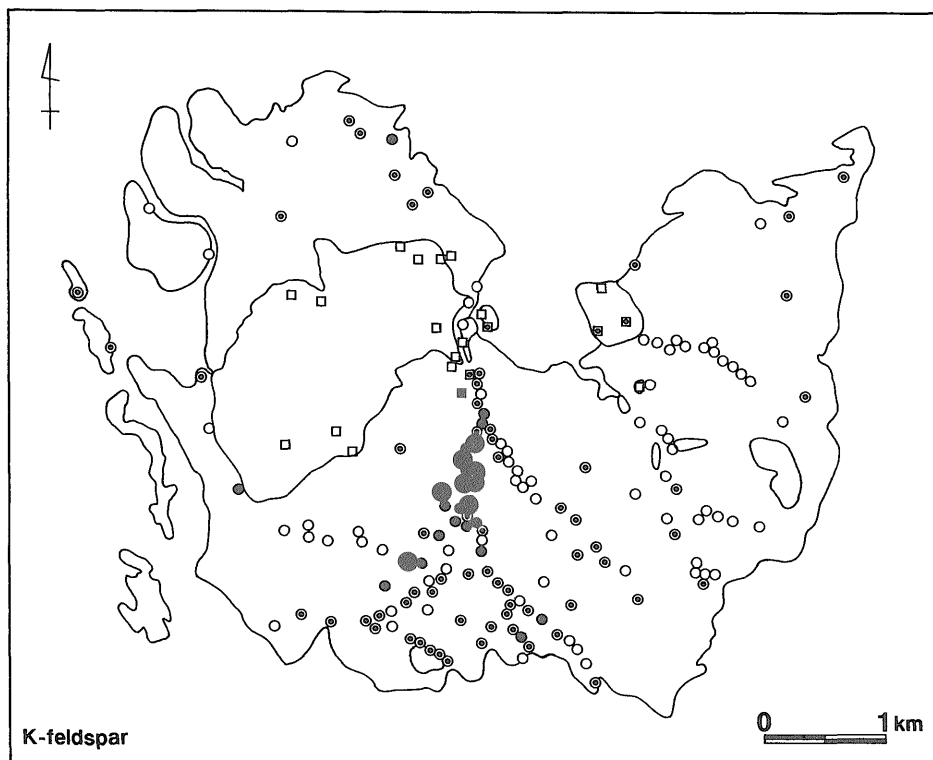
第10図 1-12 主要変質鉱物分布図。原岩区分...○：湖成層（一部火砕流堆積物），□：流紋岩。変質鉱物相対量...○，□：検出されず，◎，■：微量～少量，●，■：中量，●，■：多量。
Fig. 10 1-12 Distribution of major alteration minerals. Original rock type...○ : lake sediments and □ : Ryolite dome and intrusions. Amount of alteration minerals...○, □ : not detected, ◎, ■ : small amount, ●, ■ : moderate amount, ●, ■ : large amount.



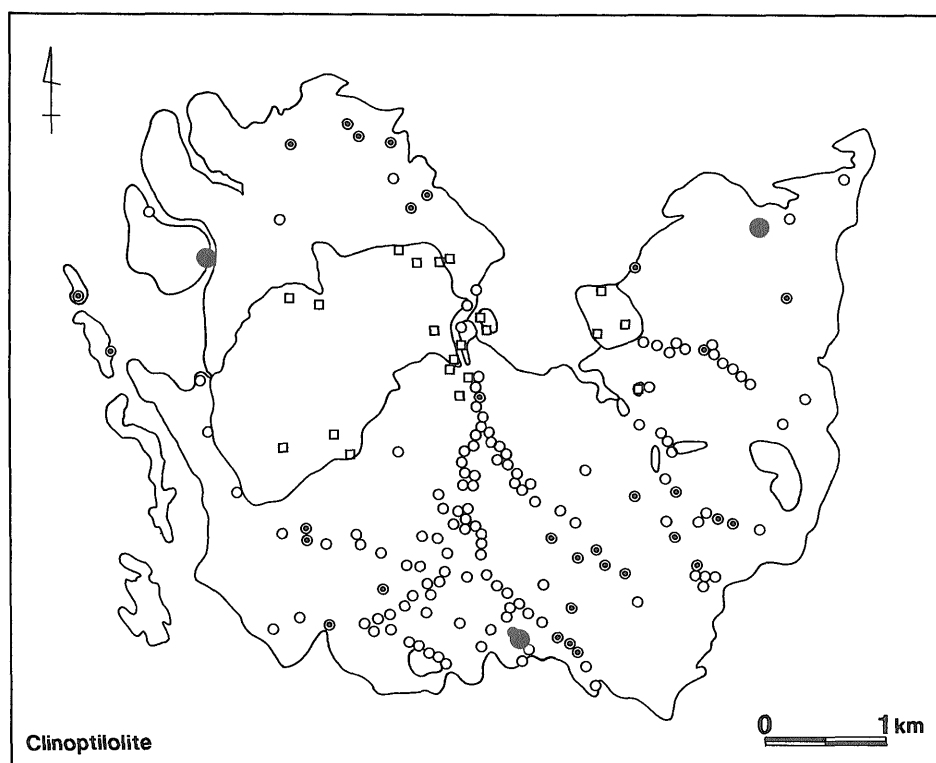
第10図-2 クリソトバライト.
Fig. 10-2 cristobalite.



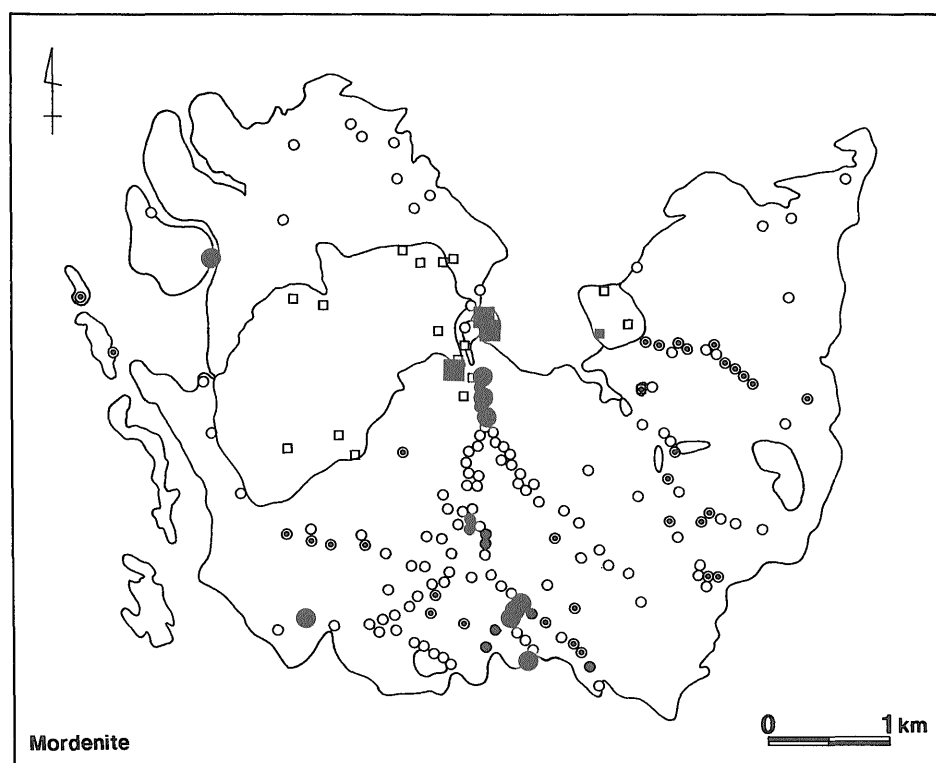
第10図-3 斜長石.
Fig. 10-3 plagioclase.



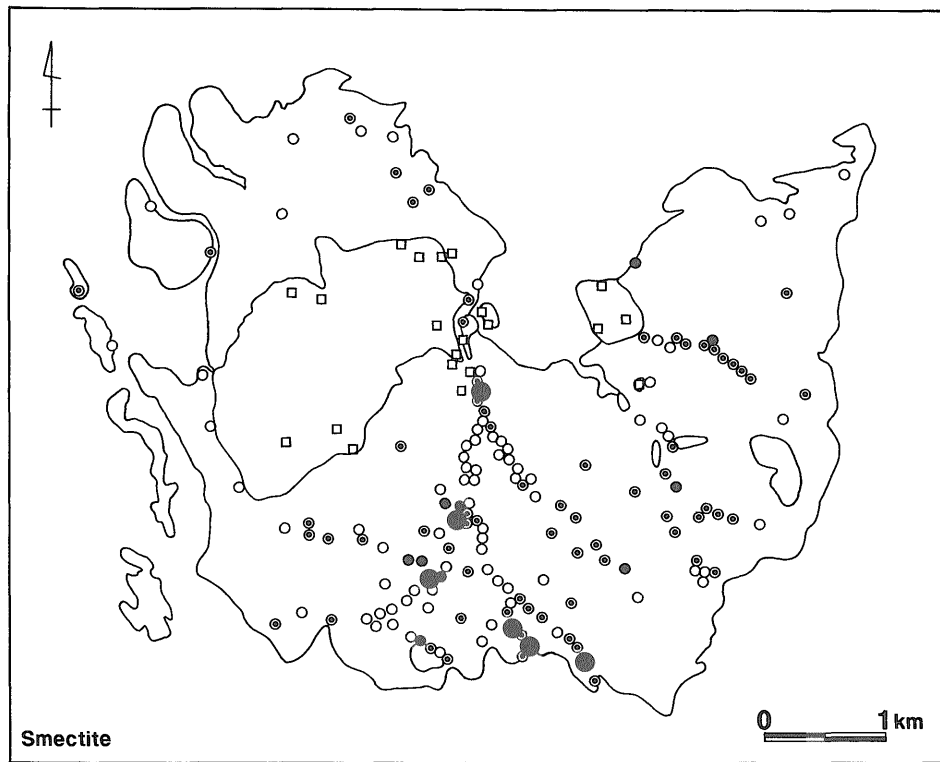
第10図-4 カリ長石.
Fig. 10-4 K-feldspar.



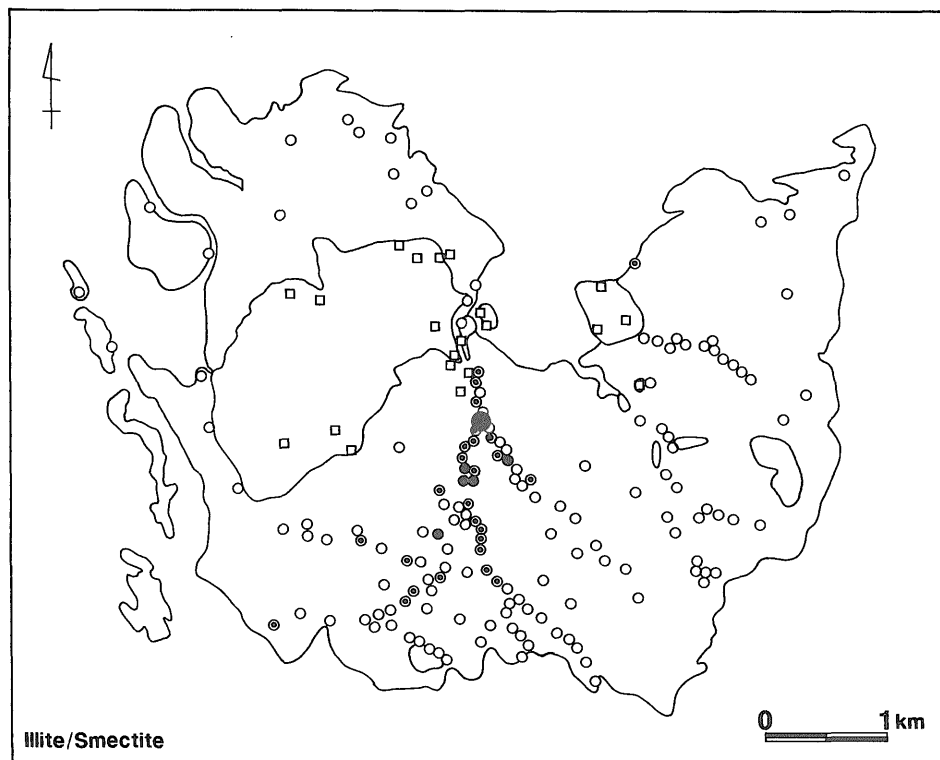
第10図-5 斜プチロル沸石.
Fig. 10-5 clinoptilolite.



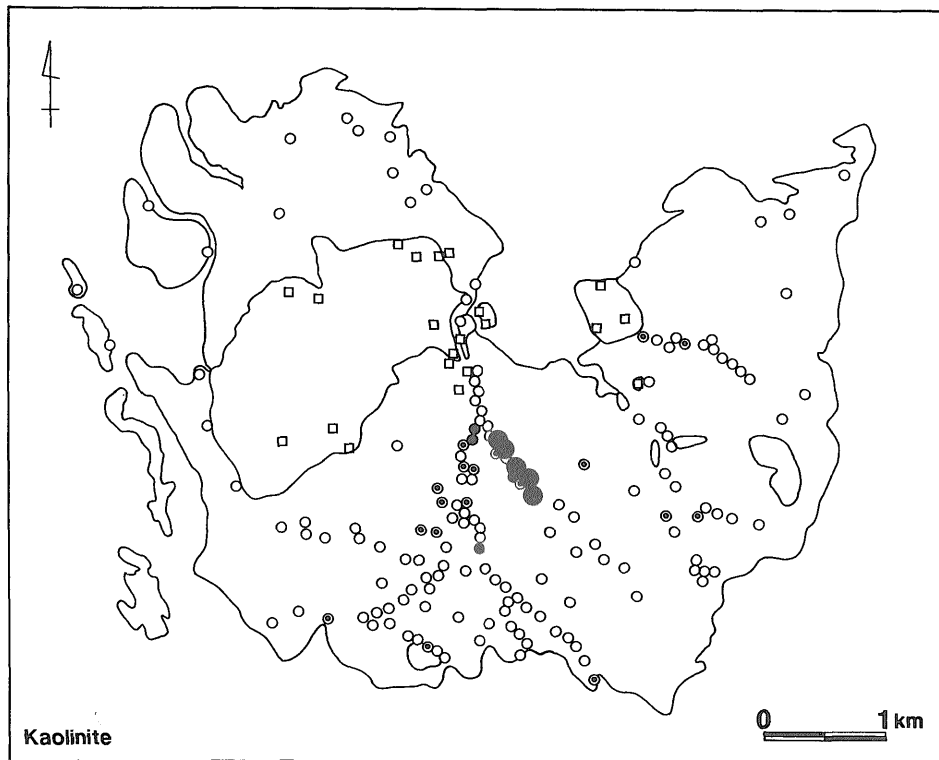
第10図-6 モルデン沸石.
Fig. 10-6 mordenite.



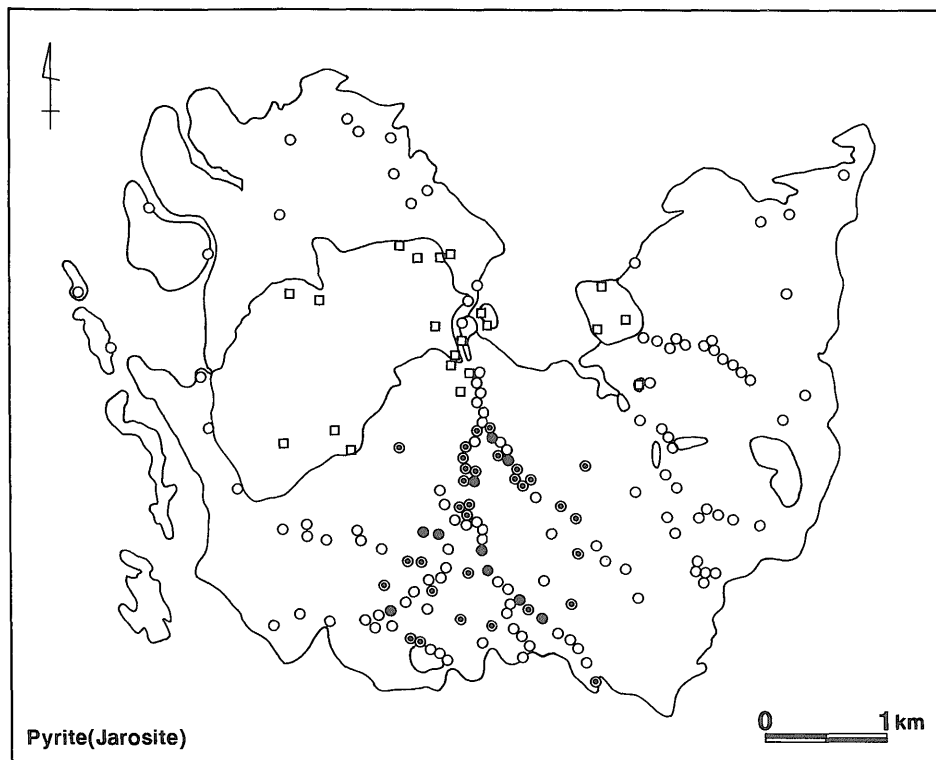
第10図-7 スメクタイト.
Fig. 10-7 smectite.



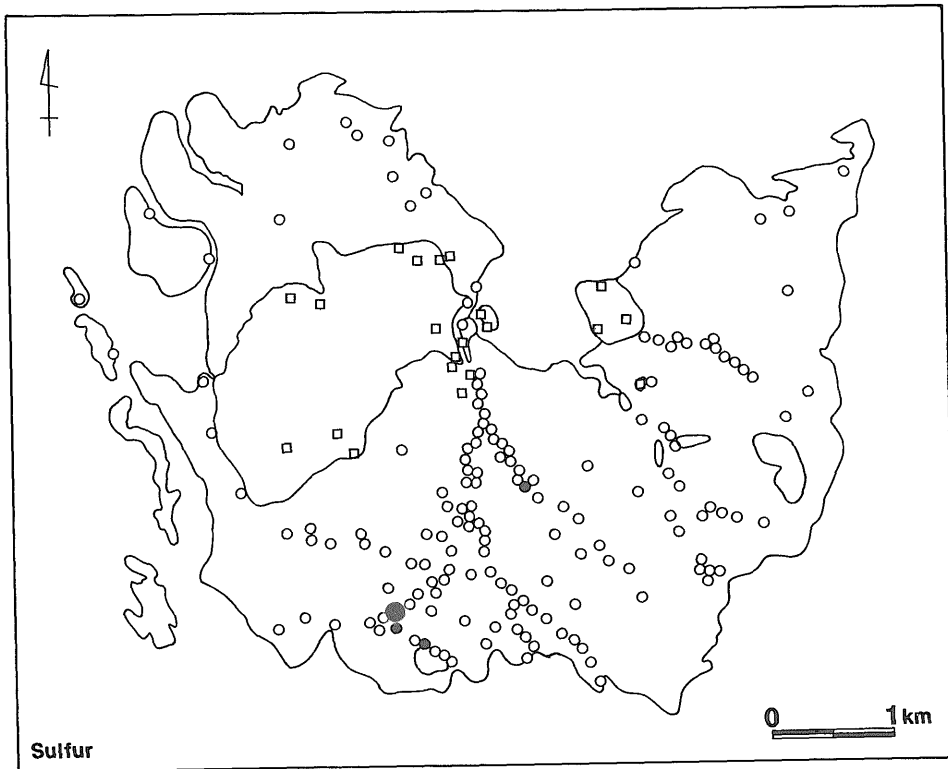
第10図-8 イライト・スメクタイト混合層鉱物.
Fig. 10-8 mixed-layered illite-smectite.



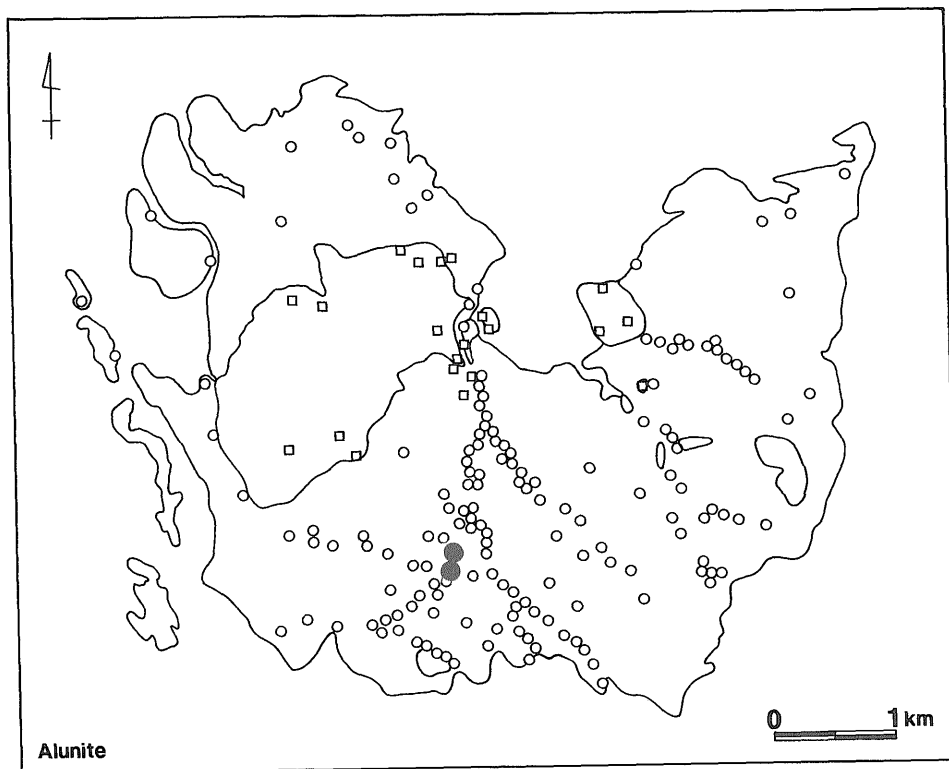
第10図-9 カオリナイト.
Fig. 10-9 kaolinite.



第10図-10 黄鉄鉱および鉄明礬石.
Fig. 10-10 pyrite or jarosite.



第10図-11 硫黄.
Fig. 10-11 sulfur.



第10図-12 明ばん石.
Fig. 10-12 alunite.

Hydrothermal mineral	Marginal		Central		Sporadic	
	LA	SZ	ML	IC	K	A
Quartz						
Cristobalite	--	--	--		--	
K-feldspar						
Kaolinite			--			
Alunite						
Smectite	--		--		--	--
Chl./Smec.			--	--		
Ill./Smec.				--		
Illite			--			
Chlorite			--			
Mordenite	--		--			
Clinoptilolite	--					
Gypsum		-	-	-		
Calcite		-	-	-		
Dolomite				--		
Siderite				--		
Sulfur		-	-		--	
Orpiment		-	-			
Pyrite		--				

-- : 少量
全幅：普遍的
— : 中量
半幅：部分的
— : 多量
1/4幅：局所的

第11図 各変質帯の鉱物組合せ。LA：弱変質帯，SZ：スメクタイト-沸石帯，ML：混合層粘土鉱物帯，IC：イライト緑泥石帯，K：カオリナイト帯，A：明ばん石帯。

Fig. 11 Mineral assemblages for alteration zones. LA: least-altered zone, SZ: smectite-zeolite zone, ML: mixed-layered clay mineral zone, IC: illite-chlorite zone, K: kaolinite zone, and A: alunite zone.

タイト混合層鉱物，緑泥石，緑泥石/スメクタイト混合層鉱物

カオリン鉱物：カオリナイト，ハロイサイト

沸石鉱物：斜プチロル沸石，モルデン沸石

炭酸塩鉱物：方解石，苦灰石，菱鉄鉱，菱苦土石，クトナホライト，菱マンガン鉱

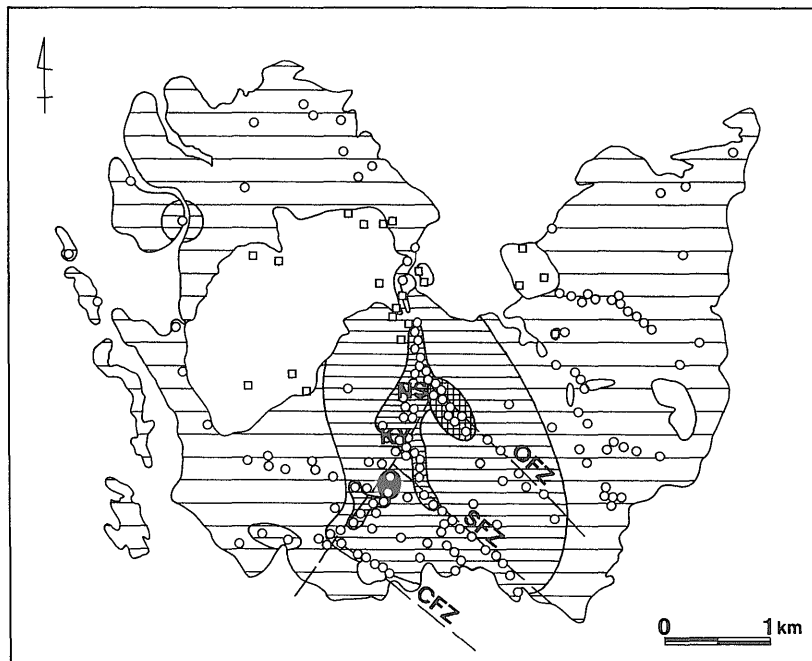
硫酸塩鉱物：石膏，鉄明ばん石，明ばん石

硫化鉱物：黄鉄鉱，閃亜鉛鉱，雄黄

その他：硫黄，角閃石，黒雲母，非晶質ガラス

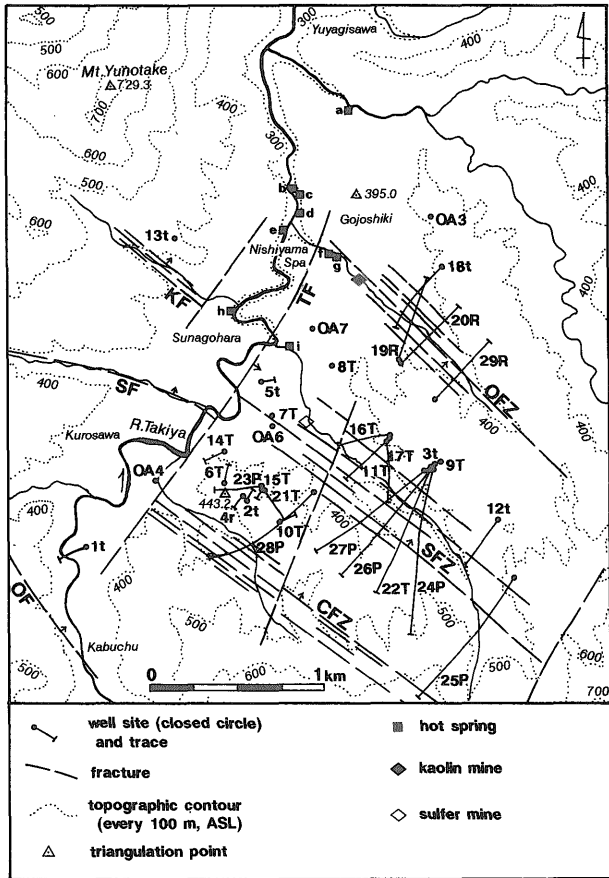
本地域の母岩の変質は，特徴的な変質鉱物の組合せおよびその分布と産状に基づいて，以下の6帯に分帯できる。各変質帯の鉱物組合せを第11図に，変質帯の分布を第12図に，坑井位置を第13図にそれぞれ示す。

1) 弱変質 (LA) 帯：全ての変質帯中で最も弱い変質帯である。西山温泉や神の湯など地熱活動の影響を強く受ける地域から離れた砂子原層分布域の周縁部に分布する(第12図)。未変質の火山ガラスを多量に含み，脱ハリの程度が弱いことを特徴とする(第11図)。少量のスメクタイト，モルデン沸石，斜プチロル沸石を含むものもある。本帯の凝灰岩や凝灰質碎屑岩の多くは未固結ないし固結不完全，脆弱で間隙に富み，青灰～明灰色を呈する。自然乾燥状態での平均密度は1.53で，カオリナイト帯に次いで低い。鏡下では，石英，斜長石，黒雲母などの鉱物粒子，流紋岩岩片およびガラス質の基質が認められる。鉱物粒子は新鮮で，基質の脱ハリは進んでいない(第14図)。



第12図 変質帯分布図。——：弱変質帯，——：スメクタイト-沸石帯，——：混合層粘土鉱物帯，#####：カオリナイト帯，●：明ばん石帯。略号は第4図と同じ。

Fig. 12 Distribution of alteration zones. —— : least-altered zone, —— : smectite-zeolite zone, —— : mixed-layered clay mineral zone, ##### : kaolinite zone, ● : alunite zone). The other abbreviations are the same as in Fig. 4.



第13図 坑井位置図。TF：滝谷川断層，KF：北の沢断層，SF：簾沢断層，OF：小野川原断層。その他の略号は第2図と同じ。

Fig. 13 Map showing well head locations and traces of the wells. TF: Takiyagawa fault, KF: Kitanosawa fault, SF: Sudarezawa fault and OF: Onogawara fault. The other abbreviations are the same as in Fig. 2.

2) スメクタイト・沸石 (SZ) 帯：弱変質帯に次いで弱い変質帯である。地表では、弱変質帯の内側を占め、西山温泉や神の湯などを取り囲むように分布する (第12図)。坑井では、地表から地下100m 前後までの間に認められることが多い (第15図)。中量から多量のスメクタイト、モルデン沸石または斜プチロル沸石により特徴づけられ、石英、斜長石を伴う。カリ長石、クリストバライト、方解石、黄鉄鉱を伴うこともある (第11図)。本帯の凝灰岩や凝灰質碎屑岩は、変質の進行度に応じて物性に幅がみられる。すなわち変質が進行していない岩石は、弱変質帯と同様に固結不完全、脆弱で間隙に富むが、変質の進行とともに固結度が高まり堅硬、緻密になり、密度も増加する。色調は青灰～灰白色を呈するが、スメクタイトを多量に含む変質岩には緑、青、ピンク色などを呈するものもある (第16図)。平均密度は1.77で、混合層粘土鉱物帯に次いで高い。鏡下では、石英、斜長石、黒雲母などの鉱物粒子、流紋岩片が普通に見られる。斜長石は新鮮なものが多く、基質は脱ハリするとともに粘土

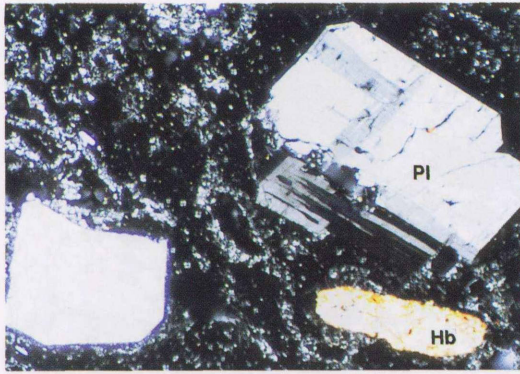
鉱物・沸石鉱物に交代される (第14図)。走査電顕では、空隙に直接生長したモルデン沸石が認められる (第17図)。

3) 混合層粘土鉱物 (ML) 帯：地熱活動の影響を強く受けた変質帯のひとつである。地表では西山温泉や神の湯などの周辺に分布する (第12図)。坑井では、本帯がスメクタイト・沸石帯の下位、深度100m 前後からそれ以深に現れる場合と、本帯を欠きスメクタイト沸石帯とイライト・緑泥石帯が直接する場合とがある (第15図)。イライト・スメクタイト混合層鉱物により特徴づけられ、石英、斜長石、カリ長石を伴うが、斜長石は変質の進行度が高い岩石では認められない (第11図)。カオリナイト、モルデン沸石、斜プチロル沸石、緑泥石・スメクタイト混合層鉱物、黄鉄鉱、鉄明ばん石を伴うことがある。本帯の凝灰岩や凝灰質碎屑岩の多くは、珪化・カリ長石化作用などにより固結度が高く堅硬、緻密で、青灰～明灰色を呈する (第16図)。平均密度は1.81で、測定された全ての変質帯中で最も高い。鏡下では、石英、黒雲母などの鉱物粒子、流紋岩片が普通に見られる。基質の脱ハリ、粘土鉱物化・カリ長石化、黄鉄鉱化が著しく (第14図)、斜長石や流紋岩片の多くはカリ長石、粘土鉱物、黄鉄鉱などに交代される。また、既存石英粒子の周囲に二次的に成長した石英が普通認められる (第14図)。走査電顕では、空隙に直接生長した石英、カリ長石が普通に認められる (第17図)。

4) イライト-緑泥石 (IC) 帯：砂子原層に見られる変質帯の中で、最も地熱活動の中心近くにみられる変質帯である。地表では認められない。地熱生産ゾーンの上部に掘削された坑井の一部で、深度約200m 以深において認められる (第15図)。緑泥石とイライトにより特徴づけられ、石英、斜長石を伴うが、斜長石は変質の進行度が高い岩石では認められない。カリ長石、苦灰石、菱鉄鉱、黄鉄鉱を伴うこともある (第11図)。本帯の凝灰岩や凝灰質碎屑岩も混合層粘土鉱物帯と同様に固結度が高く堅硬、緻密で、青灰～淡緑灰色を呈する。鏡下では、石英、斜長石、黒雲母などの鉱物粒子、流紋岩片が普通に見られる。基質の脱ハリ、粘土鉱物化が著しく、斜長石や流紋岩片の多くは粘土鉱物、黄鉄鉱などに交代される。

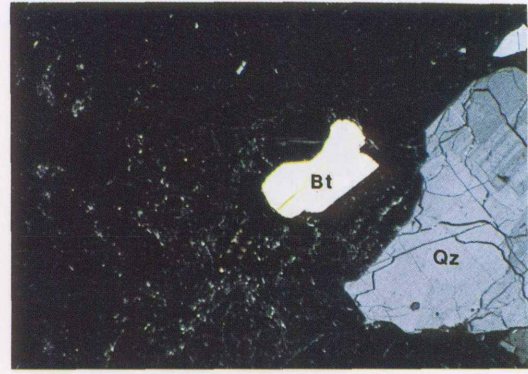
5) カオリナイト (K) 帯：老沢の北西部に沿って分布する酸性変質帯である (第12図)。また、一部の孔井 (例えば84N-2t) の地下にも認められる。多量のカオリナイトにより特徴づけられ、石英、黄鉄鉱を伴う (第11図)。スメクタイト、クリストバライト、硫黄を伴うことがある。本帯の凝灰岩や凝灰質碎屑岩の多くは粘土化変質が著しく、自然含水率が高く軟質である。黄鉄鉱を伴うものは明灰～灰色、伴わないものは白～クリーム色を呈する (第16図)。平均密度 (6試料) は1.45で、測定された変質帯の中では最も低い。鏡下では、脱ハリ、カオリナイト化した基質と初生の石英粒子が認められる。

6) 明ばん石 (A) 帯：砂子原層に見られる変質帯の中



第14図-1 湯の岳流紋岩。斑晶鉱物は斜長石(Pl)および角閃石(Hb)。クロスニコル(上)および平行ニコル(下)。長辺の長さは約2mm

Fig. 14-1 Yunotake Rhyolite. Phenocrysts of plagioclase (Pl) and hornblende (Hb) and glassy groundmass. 2 mm width. Crossed polar (upper) and plane polar (lower).



第14図-2 湯の岳流紋岩。斑晶鉱物は石英(Qz)および黒雲母(Bt)。石基はパーライト組織を示す。クロスニコル(上)および平行ニコル(下)。長辺の長さは約2mm。

Fig. 14-2 Yunotake Rhyolite. Phenocrysts of quartz (Qz) and biotite (Bt) and glassy groundmass showing perlitic structure. 2 mm width. Crossed polar (upper) and plane polar (lower).

第14図 変質岩の薄片顕微鏡写真

Fig. 14 Photomicrographs of altered bedrocks of the Sunagohara Formation.

で、最も強い酸性の特徴をもつ変質帯である。地熱発電所西側の滝谷川に沿った直径200m程度の範囲内に局所的に分布する(第12図)。多量の明ばん石により特徴づけられ、石英、クリストバライト、斜長石を伴う(第11図)。本帯の凝灰岩や凝灰質砕屑岩は変質の進行度が高く、白色化が著しく、脆弱でやや粗しょうである。鏡下では、明ばん石、クリストバライトに交代された基質と初生の石英粒子が認められる。

4.3 変質鉱物の分布、産状および特徴

主要な変質鉱物の産状と特徴を以下に述べる。

1) シリカ鉱物

石英：初生、脱ハリによる生成、流体からの直接沈殿の3種が認められる。初生石英はほとんど全ての岩石に含まれる。火山ガラスの脱ハリによる石英の生成は、弱変質帯以外で広範囲で認められる。スメクタイト・沸石帯、混合層粘土鉱物帯、イライト・緑泥石帯では空隙に面して自由成長する石英が普通に見られる(第17図)。西山温泉周辺では、細脈としても産する。

クリストバライト：砂子原層中の流紋岩中に初生鉱物として少量認められるほか、スメクタイト・沸石帯や明ばん石帯の凝灰岩中には火山ガラスが変質したクリストバライトが少量～大量に認められることがある。

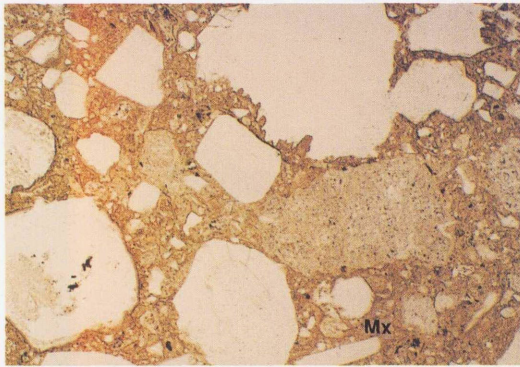
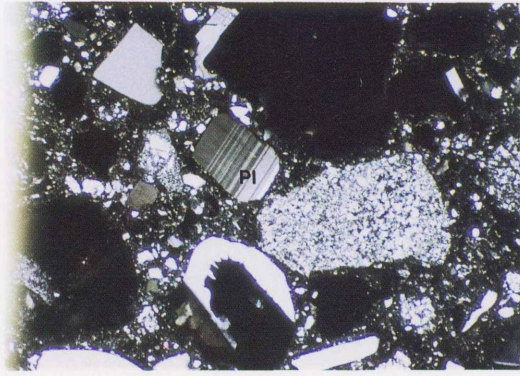
2) 長石鉱物

斜長石：初生鉱物として量の多寡はあるもののほぼ普遍的に認められる。西山温泉周辺の混合層粘土鉱物帯や坑井のイライト・緑泥石帯では、イライト・スメクタイト混合層鉱物、カリ長石、黄鉄鉱などに完全に交代され消失することがある。

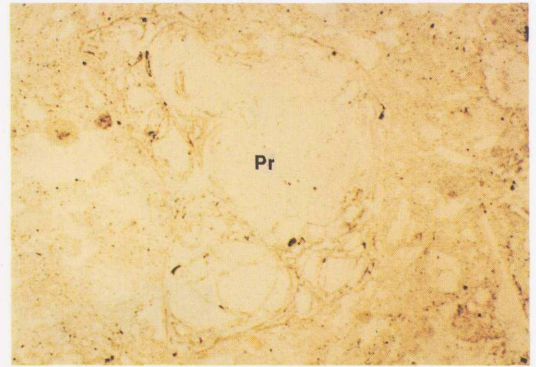
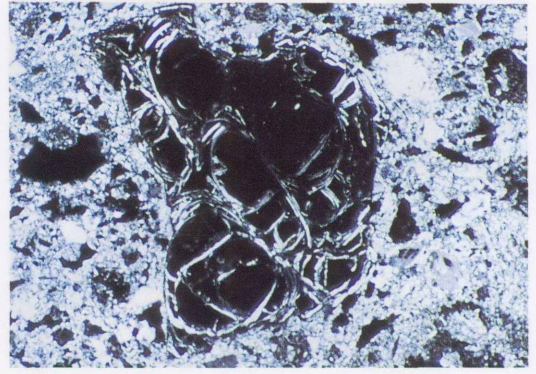
カリ長石：初生鉱物として砂子原層全域にわたり微量ないし少量見られるほか、西山温泉周辺の混合層粘土鉱物帯中では火山ガラスや斜長石を交代して、あるいは空隙中に自由成長する変質鉱物として多量に認められる(第17図)。

3) 雲母粘土鉱物

砂子原層の流紋岩、流紋岩質凝灰岩およびそれらの二次堆積物には、粗粒の初生黒雲母が含まれる。熱水性のイライトおよびイライト・スメクタイト混合層鉱物は火



第14図-3 スメクタイト・沸石帯の凝灰質砂岩。斜長石 (Pl) は新鮮だが、基質の脱ハリ、沸石化、粘土化は進んでいる (Mx)。クロスニコル(上)および平行ニコル(下)。長辺の長さは約 2 mm。Fig. 14-3 Tuffaceous sandstone from smectite-zeolite zone. Fresh plagioclase and devitrified, zeolitized and argillized groundmass. 2 mm width. Crossed polar (upper) and plane polar (lower).



第14図-4 スメクタイト・沸石帯の凝灰質砂岩。パーライト質流紋岩の岩片 (Pr) は新鮮である。クロスニコル (上) および平行ニコル (下)。長辺の長さは約 2 mm。Fig. 14-4 Tuffaceous sandstone from smectite-zeolite zone. Fresh perlite fragment and devitrified, zeolitized and argillized groundmass. 2 mm width. Crossed polar (upper) and plane polar (lower).

山ガラスや斜長石を交代して産し、地熱系の周縁部から活動中心の深部に向かい、スメクタイトからイライト・スメクタイト混合層鉱物を経てイライトへ、より高温を指示する方向に連続的に変化する。

4) 緑泥石および緑泥石/スメクタイト混合層鉱物

緑泥石：地熱貯留槽上部の坑井の一部に少量認められる。

緑泥石/スメクタイト混合層鉱物：西山温泉周辺の混合層粘土鉱物帯の一部と地熱貯留槽上部の坑井の一部に少量認められる。

5) カオリン鉱物

カオリナイト：老沢北西部沿いでは、細粒凝灰岩の火山ガラスを交代して多量に産出する。そこでは石英、スメクタイト、黄鉄鉱と共存するが、西山温泉周辺の混合層粘土鉱物帯では、カリ長石、イライト・スメクタイト混合層鉱物との共存が普通に見られる。そこでのカオリナイトの出現頻度と量は、カオリナイト帯が分布する老沢北西部に向かい増加する。

ハロイサイト：スメクタイト・沸石帯の一部で火山ガラスを交代して産する。

6) 沸石鉱物

モルデン沸石：スメクタイト・沸石帯の特徴鉱物として、火山ガラスを交代してしばしば多量に産する。西山温泉北部、神の湯周辺、猿倉沢中流部などを中心に分布する。

斜ブチロル沸石：火山ガラスを交代して産する。猿倉沢中流部、小野川原北方、久保田北方など、砂子原層周縁部の弱変質帯の一部にみられる。

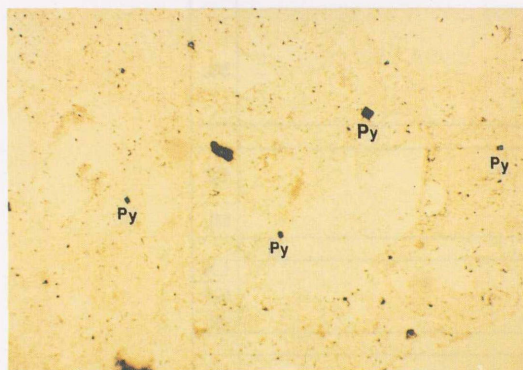
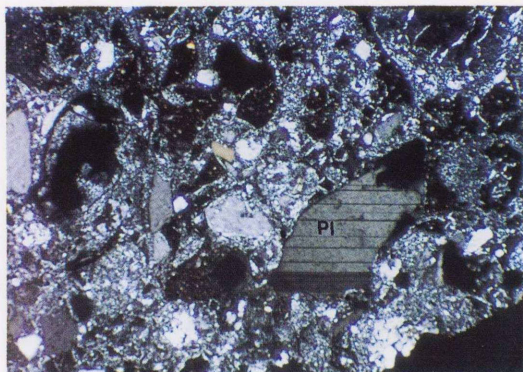
いずれも火山ガラスを交代し、あるいは空隙中に自由成長する(第17図)。坑井では、いずれの沸石も地層温度 50~80°C以下の領域で普通に認められる。

7) 炭酸塩鉱物

炭酸塩鉱物が斜長石や基質のガラスを交代して、あるいは空隙に直接沈殿して産することがあるが、地表の試料では全岩試料の X 線回折により同定可能な程度に含まれることはまれである。

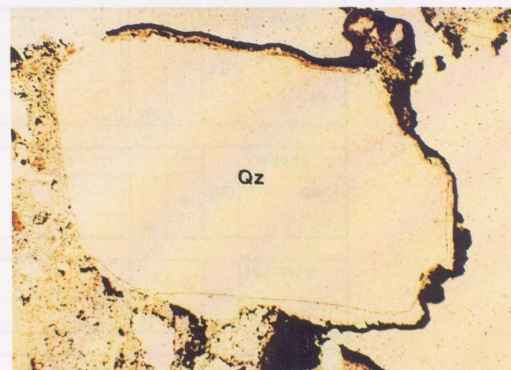
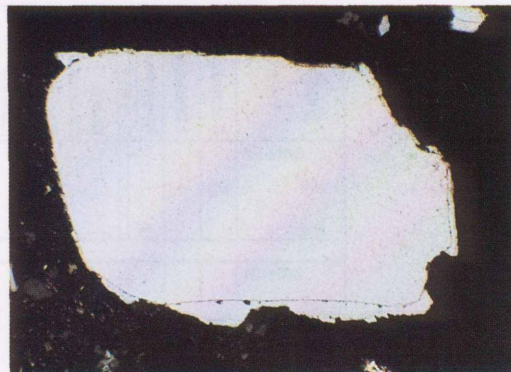
方解石：砂子原層周縁部の弱変質帯中に、斜長石や基質のガラスを交代してあるいは細脈として少量産することがある。

菱鉄鉱・苦灰石・菱マンガン鉱：地熱貯留槽上部の坑井で、斜長石や基質を交代してあるいは細脈として少量産することがある。



第14図-5 混合層粘土鉱物帯の凝灰質砂岩。一部の斜長石 (Pl) は新鮮だが、基質は脱ハリし、粘土化、カリ長石が進む。自形黄鉄鉱 (Py) が基質中に散在する。クロスニコル (上) および平行ニコル (下)。長辺の長さは約 2 mm。

Fig. 14-5 Tuffaceous sandstone from mixed-layered clay mineral zone. Relatively fresh plagioclase and devitrified, argillized and pyritized groundmass. 2 mm width. Crossed polar (upper) and plane polar (lower).



第14図-6 混合層粘土鉱物帯の凝灰質砂岩。初生の石英粒子の周囲を二次的に生長した石英が取りまく。クロスニコル(上) および平行ニコル (下)。長辺の長さは約 1 mm。

Fig. 14-6 Tuffaceous sandstone from mixed-layered clay mineral zone. Secondary quartz covers primary detrital quartz grain. 2 mm width. Crossed polar (upper) and plane polar (lower).

8) 硫酸塩鉱物

石膏：混合層粘土鉱物帯や坑井の一部で、基質を交代して、あるいは空隙を充填して少量産することがある。

明ばん石：地熱発電所西側の滝谷川沿いに局限して、火山ガラスからなる基質を交代して多量に産出する。

鉄明ばん石：西山温泉周辺の混合層粘土鉱物帯の風化岩中に、黄鉄鉱の風化変質鉱物として認められる。

9) 硫化鉱物

黄鉄鉱：混合層粘土鉱物帯中にみられ、特にカリ長石を多産する変質岩に含まれることが多い。自形結晶をなし斜長石を交代し、あるいは基質中に比較的均等に分散して産する。

閃亜鉛鉱：地熱貯留槽上部の坑井の一部で、少量認められる。

雄黄：西山温泉近傍の滝谷川沿いおよび血の池沢出口付近で、いずれも現在の温泉湧出箇所隣接して、局所的に認められる。未固結ないし固結不完全な粗粒堆積物中の空隙を充填して産する。

10) その他

硫黄：老沢沿いのカオリナイト帯の地形的高所で、また血の池沢出口付近や西山温泉付近の滝谷川沿いの温泉

湧出箇所の近傍に、局所的に認められる。割れ目や粗粒堆積物の粒間を充填して産する。

5. 変質岩の地化学的特徴

5.1 試料および分析法

変質に伴う化学成分の挙動をみるために、砂子原層の地表から採取した代表的な変質岩20個を対象として、全岩の主成分および微量成分を分析した。試料の採取地点は、第18図に示すように各変質帯分布域の中でできるだけ均等に散らばるように配置した。試料のうち3個は湯の岳流紋岩、残りの17個は湖成層から採取した凝灰岩、凝灰質シルト岩・砂岩である。湖成層試料は1個の中部層を除き、他は全て下部層からの試料である。

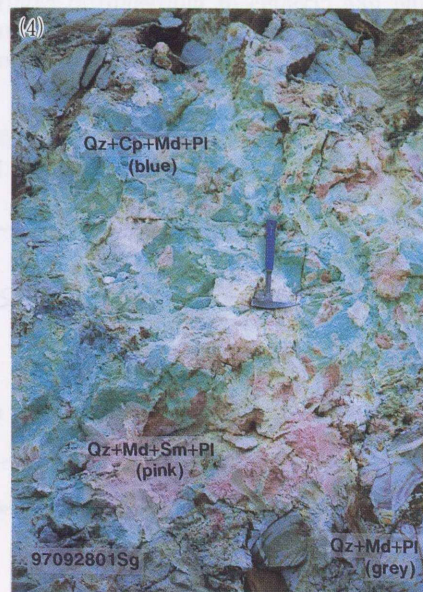
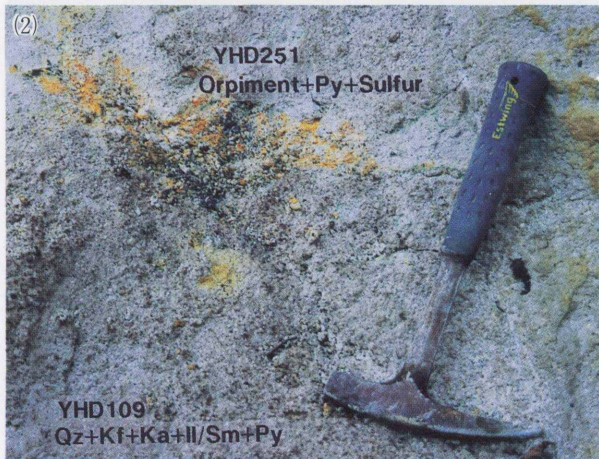
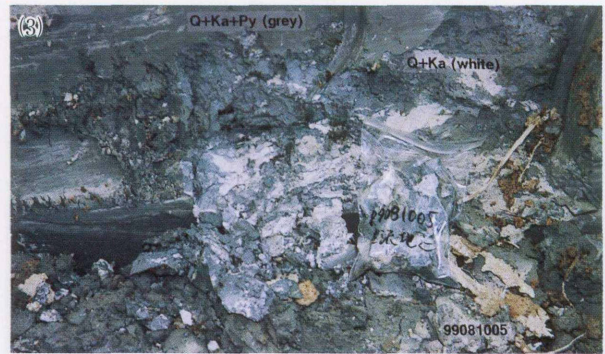
分析はカナダ、Activation Laboratories Ltd.社に依頼して実施した。分析成分と分析法を第1表に示す。なお、XRFはほう酸リチウムガラススピード法により、ICPは酸分解法により、それぞれ試料調整した。

5.2 分析結果

変質岩の主成分および微量成分の分析結果を第2表に、

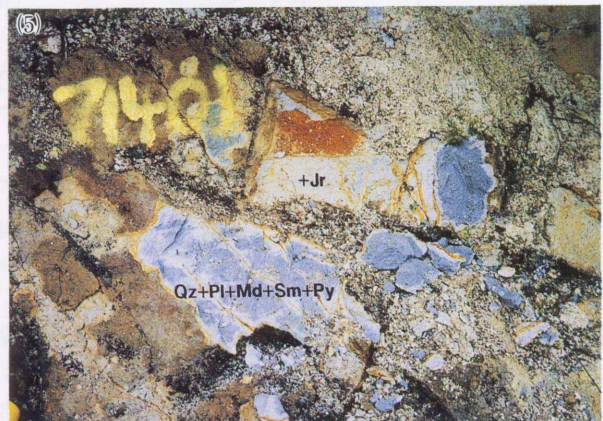
Depth (m) Well No.	Formation	Lithology	Temperature (°C) Sample	Quartz	Cristobalite	Plagioclase	K-Feldspar	Kaolinite	Smectite	Ill./Smec.	Chl./Smec	Illite	Chlorite	Epidote	Mordenite	Clinoptilolite	Laumontite	Calcite	Dolomite	Siderite	Magnesite	Kutnohorite	Rhodochrosite	Gypsum	Anhydrite	Sphalerite	Pyrite	Alteration zone				
84N-2t 100 200	Sg	tf	80																									SZ				
																															IC	
																																ML K
84N-3t 100 200	Sg	tf	60																										ML			
																																SZ
84N-5t 100 200	Sg	tf	120																										ML			
																																SZ
86N-12t 100	Sg	st	60																										SZ			
		tf																													ML	
		mst																													LA SZ ML	
86N-13t 100 200 300	Sg	tf	70																										SZ			
		Rhy																													LA	
		tf																													SZ	
87N-17T 100 200	Sg	st	70																										SZ			
		tf																													ML	
																															SZ	
88N-22T 100 200	Sg	tf	90																										SZ			
																															IC	
																															SZ	
92N-29R 100 200 300	Sg	tf	50																										SZ			
																															IC	

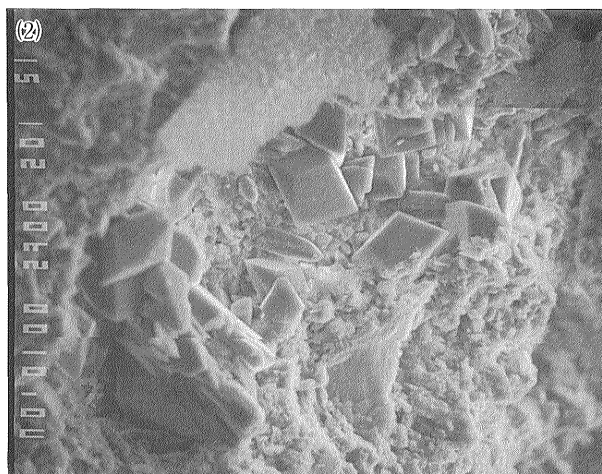
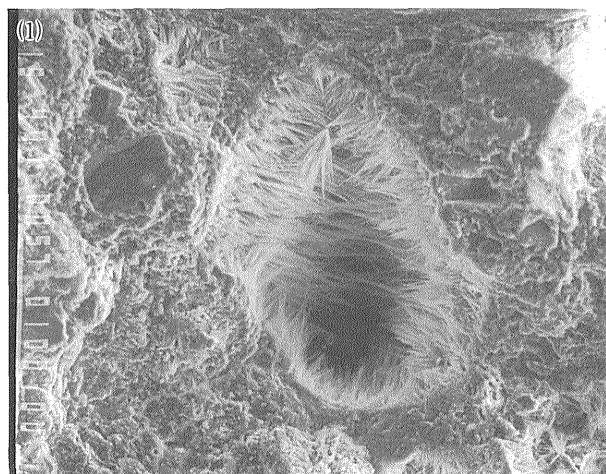
第15図 坑井で見られる砂子原層の変質鉱物。位置は第13図に示す。
Fig. 15 Alteration minerals observed in wells whose locations are shown in Fig. 13.



第16図 代表的な変質岩の露頭写真。(1) 混合層粘土鉱物帯の凝灰岩 (Q+Kf+Il/Sm+Py) の割れ目から湧出する CO₂, H₂S ガスを含む温泉水(西山温泉滝谷川遊歩道脇)。(2) 混合層粘土鉱物帯の凝灰質砂岩中のカオリナイトを含む灰色部分 (Q+Kf+Ka+Il/Sm+Py) と金を含む砒素硫化物の濃集するオレンジ色部分(Orpiment+Sulfur+Py) (西山温泉滝谷川遊歩道脇)。(3) カオリナイト帯の強粘土化変質岩(老沢北西部)。暗灰色部分は黄鉄鉱を含み, 明クリーム色部分は含まない。(4) 同一露頭で様々な色を呈するスメクタイト・沸石帯の細粒凝灰岩。緑色部分は〈Q+Clp+Md+Pl〉, ピンク色部分は〈Q+Md+Sm+Pl〉, 灰色部分は〈Q+Md+Pl〉からなる(五疊敷)。(5) スメクタイト・沸石帯の細粒凝灰岩。風化変質により〈Q+Md+Pl+Sm+Py〉からなる灰色部分に含まれる黄鉄鉱は淡褐色部分では鉄明ばん石 (Jr) となっている(西山温泉北部滝谷川)。

Fig. 16 Typical outcrops of altered bedrocks. (1) Hot spring discharge with gas bubbles of CO₂ and H₂S from a fracture in tuff, mixed-layered clay mineral zone, near Nishiyama spa. (2) Grey (Q+Kf+Ka+Il/Sm+Py) and orange parts (Orpiment+Sulfur+Py) in tuffaceous sandstone, mixed-layered clay mineral zone, near Nishiyama spa. (3) Dark grey (Q+Ka+Py) and creamy white parts (Q+Ka) of argillized rock, kaolinite zone, Oisawa. (4) Fine tuff of Smectite-zeolite zone with various colours such as green (Q+Clp+Md+Pl), pink (Q+Md+Sm+Pl) and grey (Q+Md+Pl), Gojoshiki. (5) Grey (Q+Md+Pl+Sm+Py) and light brown weathered parts (Q+Md+Pl+Sm+Py+Jarosite) of fine tuff, smectite-zeolite zone, northern part of Nishiyama spa.





(1) モルデン沸石：砂子原層湖成層下部層の凝灰岩中の孔隙に成長，西山温泉「滝の湯」北側滝谷川。

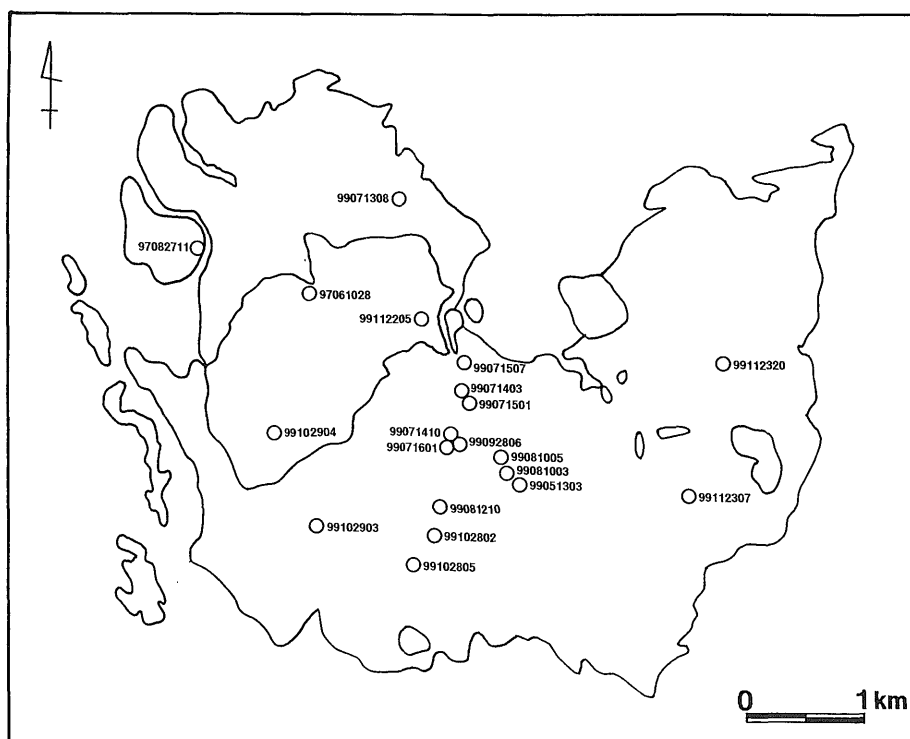
(1) Needle-like crystals of mordenite in cavity of tuffaceous rock, lower member of lake sediments of the Sunagohara Formation, Takiyagawa in Nishiyama spa.

(2) カリ長石と石英：砂子原層湖成層下部層の凝灰岩中の空隙に成長，西山温泉・滝谷川沿い遊歩道。

(2) Euhedral crystals of K-feldspar and quartz in tuff, lower member of lake sediments of the Sunagohara Formation, Takiyagawa in Nishiyama spa.

第17図 変質岩の走査電顕写真。

Fig. 17 SEM photographs of altered bedrocks.



第18図 化学分析試料採取地点。

Fig. 18 Locations of samples for chemical analysis.

成分相互の相関係数を第3表に，主な変質指標成分の濃度分布を第19図にそれぞれ示す。また，湯の岳流紋岩（3試料），弱変質帯の湖成層（4試料），スメクタイト・沸石帯（4試料），混合層粘土鉱物帯（5試料）およびカオリナイト帯（3試料）ごとの各成分の統計量を第4表に，

湯の岳流紋岩を除く各変質帯についての主な変質指標成分の平均と標準偏差を第20図に，それぞれ示す。

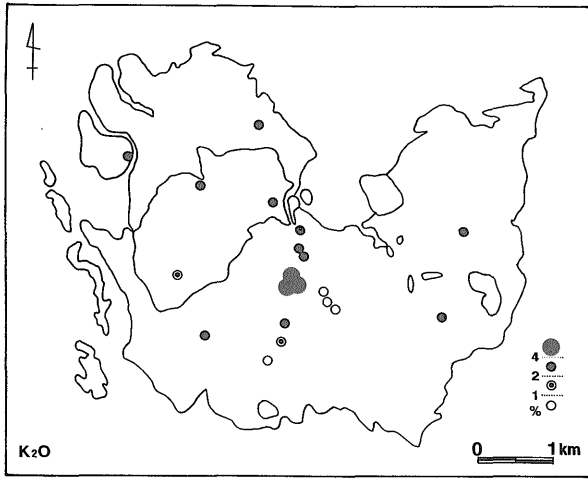
5.3 変質岩の化学成分の特徴

全岩化学分析に供した試料は，流紋岩および流紋岩質

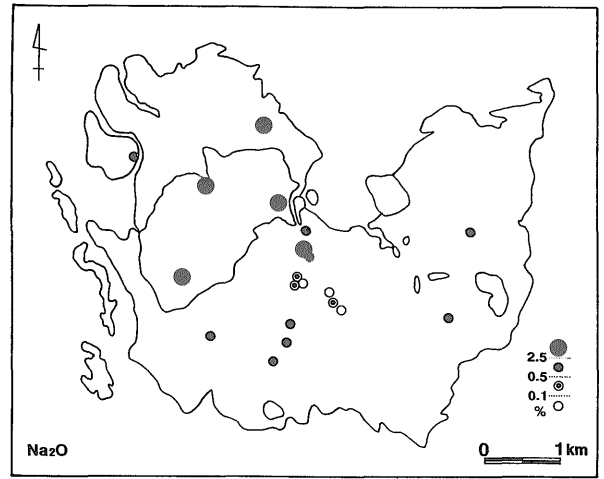
第2表 化学分析結果。Alter. miner. : 変質鉱物, Prim. miner. : 初生鉱物, member 欄の Yr : 湯の岳流紋岩, m : 砂子原層湖成層中部層, l : 同下部層。地層名の略号は第3図, 鉱物名の略号は巻末資料, 変質帯の略号は第11図のとおり。

Table 2 Results of chemical analysis. Alter. miner.: Alteration minerals, Prim. miner.: Primary minerals, Yr: Yunotake Rhyolite, m: middle member of lake sediments in the Sunagohara Formation, and l: lower member. Abbreviations for Formation name, minerals and alteration zones are the same as in Fig. 3, Appendix and Fig. 11, respectively.

No.	97061028	99102904	99112205	99071308	99112307	99112320	99102903	99071403	99071501	99071507	99071410	99071601	99092806	97082711	99081210	99102802	99102805	99051303	99081003	99081005
Locality	Yunotake-W	Onogawara-E	Yunotake-E	Kiribusitoge	Makisawa	Kubota	Sudarezawa	Nishiyama	Nishiyama	Nishiyama	Nishiyama	Nishiyama	Nishiyama	Oishizawa	Kaminoyu	Power stat'n	P.S.-W	Oisawa	Oisawa	Oisawa
Formation member	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg	Sg
Rock type	Yr	Yr	Yr	m	l	l	l	l	l	l	l	l	l	l	l	l	l	l	l	l
Alter. type	Rhy	Rhy	Rhy	tf	tfc.ms	tfc.mst	tfc.slst	tf	tf	tf	tf	tf	tf	tfc.slst	tfc.slst	tf	pm.tf	tf	tf	tf
Alter. miner.	LA	LA	LA	LA	LA	LA	LA	SZ	ML	ML	ML	ML	ML	SZ	SZ	A	SZ	K	K	K
Prim. miner.	Q,Pl,Hb,gl	Q,Cr,Pl,Hb,gl	Q,Pl,gl	Q,Pl,gl	Q,Pl,gl	gl	Q,Pl,gl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl	Q,Pl
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO2	76.46	74.23	74.60	72.33	67.30	68.10	68.28	77.63	77.80	72.38	74.94	75.98	64.35	65.13	75.33	77.80	72.76	65.75	73.43	75.86
Al2O3	12.73	13.51	12.42	13.00	13.89	13.24	13.85	12.00	12.40	11.61	13.25	11.88	11.39	13.43	12.68	10.87	10.95	18.42	13.27	14.82
Fe2O3	1.34	1.22	1.53	1.47	2.74	2.46	2.51	1.54	1.73	1.04	1.91	1.51	6.48	1.85	2.16	1.51	0.88	3.57	1.62	1.33
MnO	0.10	0.08	0.10	0.12	0.10	0.12	0.08	0.03	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00
MgO	0.14	0.12	0.15	0.35	1.49	1.41	1.06	0.21	0.32	0.23	0.32	0.28	0.16	0.84	0.52	0.35	0.87	0.14	0.43	0.00
CaO	0.83	1.01	0.82	0.51	0.90	0.93	0.82	0.54	0.25	1.00	0.03	0.04	0.01	2.48	0.89	0.35	0.41	0.02	0.10	0.03
Na2O	4.81	4.58	4.54	2.69	1.88	2.49	1.60	2.55	0.69	2.09	0.34	0.13	0.09	0.94	2.08	0.99	0.60	0.07	0.29	0.05
K2O	2.46	1.67	2.64	3.25	2.82	2.90	3.13	2.25	2.80	2.76	5.15	6.81	4.00	3.60	2.20	1.34	0.17	0.54	0.82	0.02
TiO2	0.10	0.13	0.10	0.14	0.26	0.24	0.26	0.15	0.16	0.16	0.18	0.16	0.12	0.23	0.18	0.17	0.09	0.60	0.23	0.24
P2O5	0.04	0.04	0.04	0.03	0.06	0.07	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.08	0.03	0.03	0.01	0.03	0.04	0.07
LOI	0.78	3.54	3.38	5.92	8.82	8.29	8.02	3.26	3.97	7.39	4.07	3.02	11.89	10.75	4.34	6.62	13.44	11.04	10.26	7.31
total	99.79	100.13	100.32	99.81	100.26	100.24	99.63	100.19	100.18	98.70	100.26	99.86	98.52	99.36	100.45	100.05	100.20	100.19	100.51	99.74
S	0.05	0.03	0.02	0.03	0.10	0.10	0.03	0.12	0.83	0.05	0.85	0.68	8.40	0.02	0.72	0.44	0.04	2.51	3.10	1.09
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Ba	530	560	520	640	590	500	480	450	380	510	500	720	4300	790	480	530	140	140	1500	590
Sr	71	83	69	51	74	81	104	70	40	187	13	15	25	552	90	134	57	9	77	155
Rb	63	62	67	77	72	107	81	52	90	154	160	177	94	85	71	78	7	27	29	7
Cs	2	<1	2	3	4	3	3	3	10	198	5	5	5	6	4	20	9	1	7	<1
Y	37	27	38	38	28	29	28	25	28	28	15	13	17	29	20	14	17	14	16	5
Hf	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3	3	3	2	5	3	4	3	5	4	4
Th	6	8	6	7	8	7	8	6	7	5	6	6	2	10	6	9	4	8	8	8
Sc	8	7	8	10	13	12	12	8	8	7	8	8	12	7	8	13	5	14	10	12
Au(ppb)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	142	145	1	6	1	1	1	1	1
Ag	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1	1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
As	4	2	3	1	10	10	3	36	40	145	157	29	7550	3	24	4	2	180	47	36
Hg	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	23	<1	2	<1	<1	<1
Sb	2	0	1	0	1	1	0	2	3	5	23	2	188	0	1	1	0	12	4	8
Se	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Bi	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	8
Cu	5	1	6	4	7	5	6	2	20	2	10	6	20	1	4	1	1	8	6	2
Pb	203	45	19	31	51	45	64	50	21	27	28	21	6	21	34	20	26	73	46	39
Zn	114	78	45	107	171	118	159	20	45	41	103	66	31	56	68	46	20	102	74	6
Cd	1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Mo	0	0	4	4	4	3	0	5	6	0	0	0	0	0	3	3	0	2	2	4
Ni	4	2	7	1	4	3	2	2	1	5	2	1	1	1	2	1	1	7	2	1
Co	2	0	1	3	4	3	4	3	4	2	15	3	2	5	3	2	0	7	7	4
Cr	450	2	2	2	9	7	7	5	2	2	9	2	12	2	2	2	2	14	2	2
V	3	1	1	5	23	21	22	6	7	8	10	8	8	13	10	9	1	35	12	14
Ta	<0.5	<0.5	2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

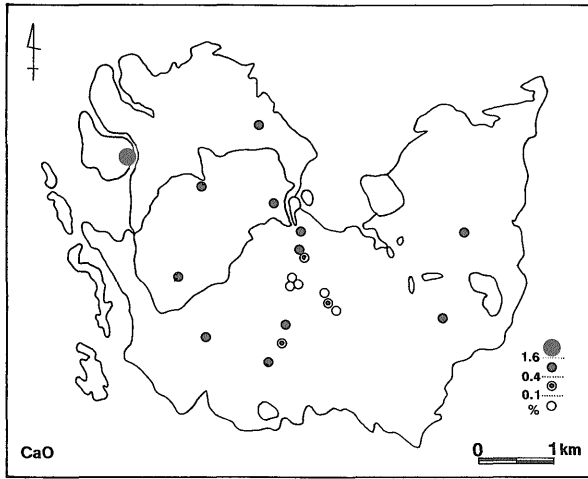


(1) K_2O

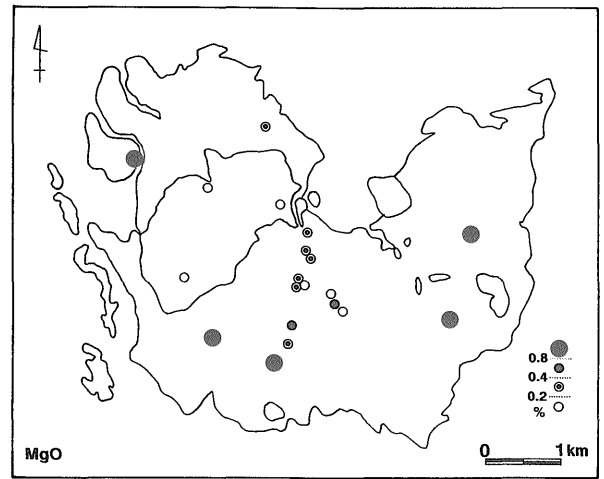


(2) Na_2O

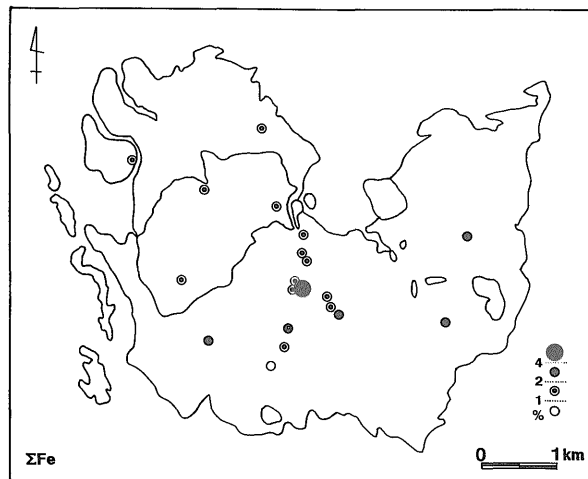
第19図 主な変質指標成分の濃度分布。
Fig. 19 Concentration distribution of key components.



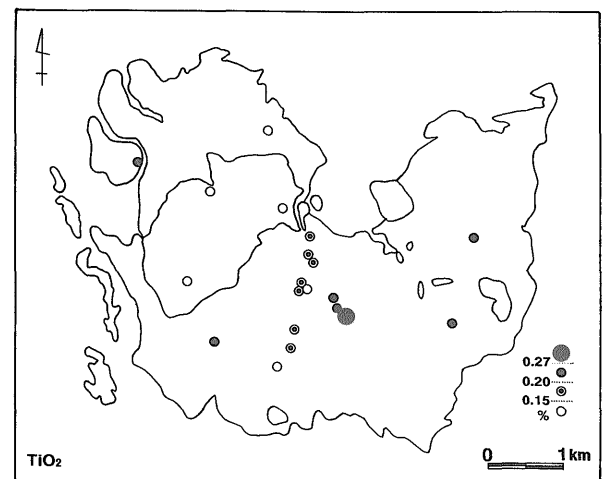
(3) CaO



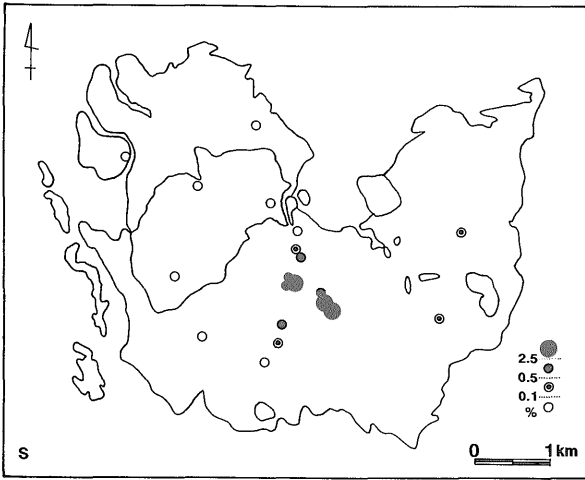
(4) MgO



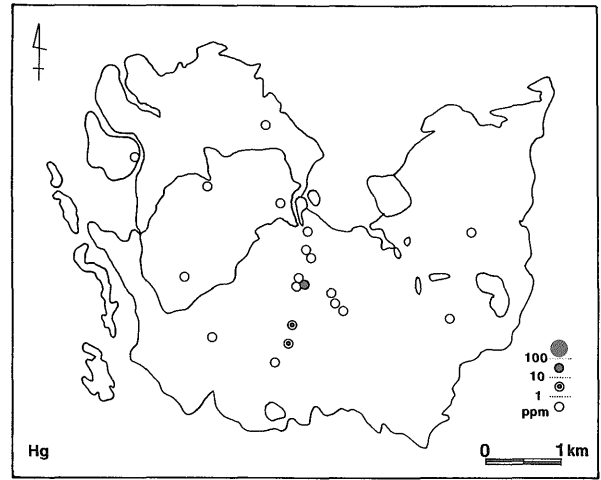
(5) T. Fe as Fe_2O_3



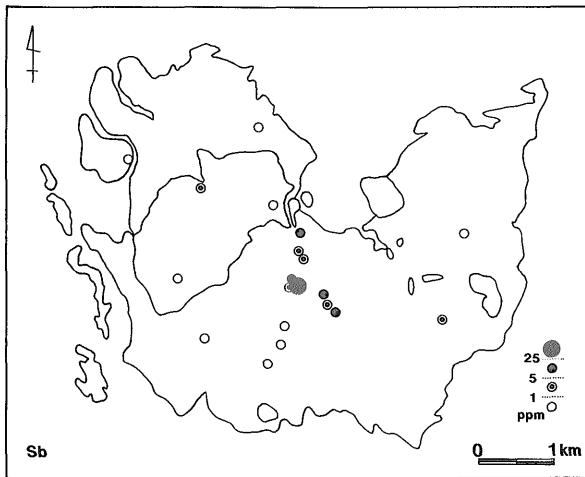
(6) TiO_2



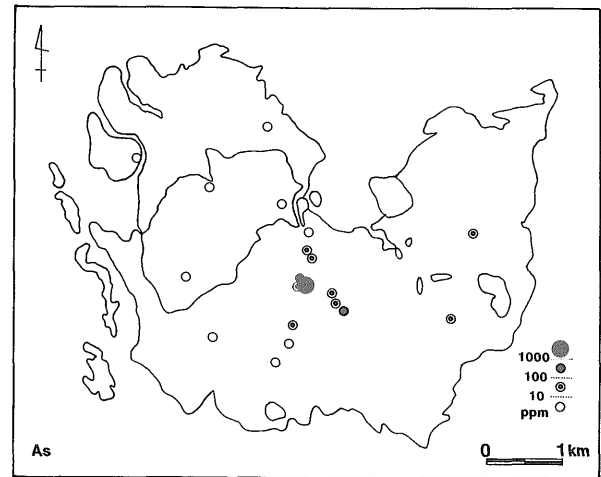
(7) S



(8) Hg



(9) Sb



(10) As

凝灰岩とその二次堆積物を主体とする凝灰質の岩石を原岩とするが、地熱活動に伴う様々な変質により、化学的に分化している。以下に各変質帯と湯の岳流紋岩について、地化学的特徴を述べる。なお、坑井のみに認められるイライト・緑泥石帯については、化学分析を行っていない。

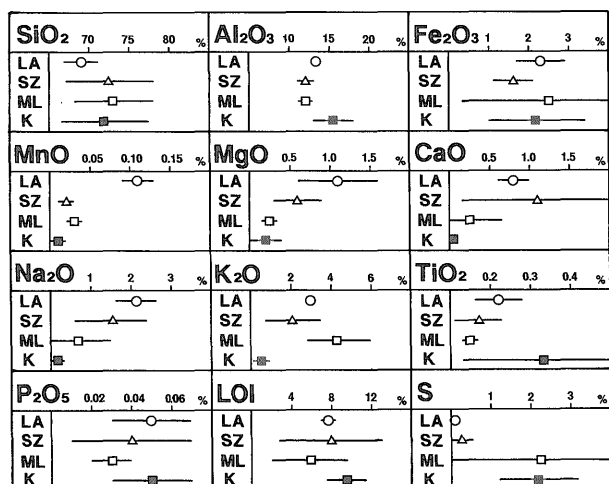
(1) 湯の岳流紋岩：ほとんどの主要成分と微量元素について、測定値の散らばりの程度を示す変異係数（＝標準偏差/平均）が最も小さく、均質な化学組成を示す。鏡下観察およびX線回折による変質鉱物同定によれば、湯の岳流紋岩のほとんどは熱水変質を受けておらず、均質で未変質の状態を保っているといえる。後述する変質指標は、いずれも熱水変質の度合いが最も小さい値を示す。

(2) 弱変質(LA)帯： SiO_2 とSは、全ての変質帯中で最も低い。Au, As, Hg, Sbの浅熱水性元素は最も低いグループに属する。それに対してMnO, MgO, Na_2O は全ての変質帯中で最も高い。砕屑粒子の多くは湯の岳流紋岩の活動に関連した火山灰を供給源としていると考えられるが、灼熱減量(LOI)を除いてから100%標準化し

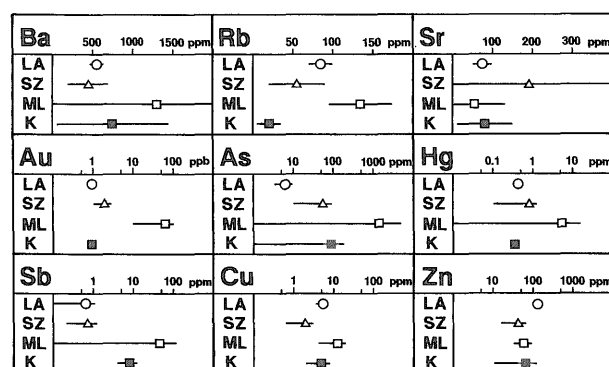
た成分組成を湯の岳流紋岩のそれと比べると、 SiO_2 と Na_2O がそれぞれ約2%少なく、 Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgOとK₂Oが約1%ずつ多い。これはマフィック鉱物や粘土鉱物の濃集・混入を示唆している。MnO, MgOと P_2O_5 を除く主要成分とほとんどの微量元素に関して変異係数は最も低いグループに属し、組成の均質性が高い。

(3) スメクタイト・沸石(SZ)帯：弱変質帯と混合層粘土鉱物帯との間に分布するスメクタイト・沸石帯は、その化学成分も両側の変質帯の中間の値を示すものが多い。すなわち、弱変質帯からスメクタイト・沸石帯を経て混合層粘土鉱物帯に向かい濃度が増加する傾向をもつ成分として SiO_2 , SおよびAu, Ag, As, Hg, Sbの浅熱水性元素、反対に減少する成分としてMgO, Na_2O , TiO_2 および P_2O_5 が挙げられる。CaOとSrは全ての變質帯中で最も高く、かつ変異係数も最大であり、それらの濃度は沸石鉱物の含有量とよく対応している。

(4) 混合層粘土鉱物(ML)帯： SiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O , SおよびAu, As, Hg, Sbの浅熱水性元素は全ての變質帯中で最も高い。このうち Fe_2O_3 , Sと浅熱水性元素につ



(1) 主要成分 (major components) : 横線が標準偏差 (+/-σ), 横線上のマークが平均。



(2) 微量元素 (minor components) : 横線が標準偏差 (+/-σ), 横線上のマークが平均。

第20図 変質帯ごとの主な変質指標成分の平均と標準偏差。
Fig. 20 Means and standard deviations (+/-σ) of key components for each alteration zone.

いては変異係数も最大である。Fe₂O₃とSの濃度は、主に黄鉄鉱の含有量に対応している。MgO, TiO₂とP₂O₅は全ての変質帯中で最小ないし最小のグループに属する。

(5) カオリナイト (K) 帯: MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, Rb および Sr が全ての変質帯中で最も低く、かつそれらの変異係数も最小ないし最小のグループに属する。反対に Al₂O₃, TiO₂および S は、全ての変質帯中で最大ないし最大のグループに属する。TiO₂の変異係数は全ての変質帯中で最も高い。

(6) 明ばん石 (A) 帯: SiO₂は全ての変質帯の中で最も高い。反対に Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, K₂O, P₂O₅, Ba, Au, As, Cu および Zn が、全ての変質帯中で最小ないし最小のグループに属する。

全試料についての30成分相互の相関係数(第3表)の中で、0.70以上の高い相関が認められた成分組合せは以下のとおりである。Al₂O₃-TiO₂ (0.862), Al₂O₃-V (0.763), Fe₂O₃-S (0.847), Fe₂O₃-Ba (0.784), Fe₂O₃-

-As (0.859), Fe₂O₃-Hg (0.846), Fe₂O₃-Sb (0.864), MnO-Na₂O (0.736), MnO-Y (0.780), CaO-Sr (0.816), Na₂O-Y (0.783), K₂O-Rb (0.880), TiO₂-Hf (0.732), TiO₂-V (0.921), S-Ba (0.911), S-As (0.907), S-Hg (0.892), S-Sb (0.919), Ba-As (0.949), Ba-Hg (0.941), Ba-Sb (0.940), Sc-V (0.782), As-Hg (0.990), As-Sb (0.994), Hg-Sb (0.980) および Pb-Cr (0.920)。負の強い相関は見られず、SiO₂-Fe₂O₃間の-0.671が最高の負相関である。強い相関をもつ成分群には、地球化学的に共通の特徴をもつ複数のグループが認められる。成分相互の相関が高い最も顕著なグループは、Ba, As, Hg, Sbの浅熱水性元素であり、Auもこれらと0.6以上の正相関をもつ。S, Feもこれらの元素と挙動をとりにしている。CaとSr, KとRbは、それぞれアルカリ土類金属およびアルカリ金属の中で相互に最もイオン半径が近い元素として、またTiとHfは同じチタン属の元素として共通の挙動をしていると考えられる。TiとVはその多くが酸化鉄鉱物中に濃集することにより、同じ挙動をとるのであろう。MnとNa, KとRbは、それぞれ変質が弱い段階から比較的直線的に減少および増加の挙動を示す。

5.4 変質指標

地熱資源や鉱物資源探査では、変質に伴って濃集あるいは溶脱される成分を適当に組み合わせることにより変質の進行程度を数値で表す変質指標がしばしば利用される。以下に第5表に示した変質指標値に基づいて、砂子原層の変質帯に対するそれらの適用性を検討する。

(1) K₂O/Na₂O: 熱水変質に普通に見られる、Na₂Oの溶脱とK₂Oの付加を想定した変質指標である。砂子原層の変質では、弱変質帯とスメクタイト・沸石帯はほとんど同じ値を示し、混合層粘土鉱物帯で増加する。またカオリナイト帯は両者の中間の値をとる。しかし、強酸性変質帯である明ばん石帯については弱変質帯と同じ低い指標値しか得られない。

(2) K₂O/(K₂O+Na₂O): 前項と同じ考え方で適用する変質指標である。前項の指標値と同じ傾向を示す。

(3) K₂O/(K₂O+Na₂O+CaO): 前2者に伴うCaOの溶脱を加味した指標であり、高橋(1988)により細倉鉱床で用いられた。この指標では前2者の傾向に加えて、スメクタイト・沸石帯が弱変質帯よりも低い値となる。これは、砂子原層の変質ではスメクタイト・沸石帯においてCaOが増加していることによる(第21図(1))。

(4) K₂O/(K₂O+Na₂O+CaO+MgO): さらに変質に伴うMgOの溶脱を加味した両角ほか(1999)による指標である。前項の指標と同じ傾向を示す。

(5) Rb/Sr: 高鳥・南野(1985)により浅熱水性鉱床の探査で有効とされる、Srの溶脱とRbの付加を想定した変質指標である。混合層粘土鉱物帯が最高値を示すが、

第3表 化学成分相互の相関。

Table 3 Correlation matrix for all samples.

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	S	Ba	Rb	Sr	Y	Cs	Hf	Sc	Au	As	Hg	Sb	Cu	Pb	Zn	Mo	Ni	Co	Cr	V				
SiO ₂	-0.398	-0.671	-0.077	-0.482	-0.315	0.222	-0.075	-0.518	-0.245	-0.405	-0.402	0.022	-0.284	-0.077	0.019	-0.231	-0.434	-0.183	-0.437	-0.391	-0.428	-0.188	0.103	-0.380	0.337	-0.131	-0.075	0.185	-0.599				
Al ₂ O ₃		0.181	0.014	0.001	-0.054	-0.132	-0.278	0.862	0.359	0.015	-0.248	-0.324	-0.015	-0.145	-0.249	0.616	0.545	-0.282	-0.214	-0.266	-0.173	0.005	0.265	0.404	0.064	0.533	0.405	-0.017	0.763				
Fe ₂ O ₃			-0.105	0.067	-0.211	-0.321	0.190	0.290	-0.070	0.847	0.784	0.050	-0.184	-0.169	-0.198	-0.134	0.538	0.559	0.859	0.846	0.864	0.661	-0.132	0.133	-0.125	0.119	0.092	-0.101	0.403				
MnO				0.381	0.297	0.736	0.200	-0.209	0.204	-0.381	-0.178	0.087	-0.166	0.780	-0.221	-0.240	0.089	-0.195	-0.207	-0.218	-0.244	-0.077	0.348	0.639	0.169	0.264	-0.270	0.303	-0.061				
MgO					0.409	-0.047	0.074	0.175	0.310	-0.269	-0.161	0.036	0.196	0.211	-0.121	0.196	0.221	-0.197	-0.179	-0.174	-0.206	-0.106	-0.058	0.576	0.003	-0.046	-0.001	-0.173	0.420				
CaO						0.432	0.071	-0.046	0.458	-0.441	-0.206	0.062	0.816	0.569	0.151	0.245	-0.269	-0.335	-0.250	-0.242	-0.295	-0.423	0.073	0.162	-0.167	-0.110	-0.243	0.083	-0.042				
Na ₂ O							-0.044	-0.393	0.078	-0.450	-0.253	-0.045	-0.026	0.783	0.026	-0.340	-0.270	-0.342	-0.252	-0.247	-0.294	-0.319	0.462	0.223	0.072	0.263	-0.461	0.463	-0.407				
K ₂ O								-0.249	-0.038	0.053	0.231	0.880	-0.025	0.179	0.022	-0.334	-0.174	0.590	0.207	0.182	0.222	0.336	-0.170	0.246	-0.258	0.020	0.247	-0.011	-0.116				
TiO ₂									0.214	0.090	-0.203	-0.210	0.067	-0.275	-0.071	0.732	0.067	-0.190	-0.150	-0.177	-0.120	0.034	0.087	0.348	0.045	0.418	0.384	-0.183	0.921				
P ₂ O ₅										-0.201	-0.111	-0.084	0.535	0.046	-0.237	0.366	0.210	-0.311	-0.216	-0.229	-0.195	-0.256	0.079	0.192	0.123	0.161	0.284	0.031	0.291				
S											0.911	-0.048	-0.233	-0.389	-0.108	-0.228	0.317	0.637	0.907	0.892	0.919	0.648	-0.195	-0.220	-0.178	-0.069	0.096	-0.090	0.115				
Ba												0.093	-0.068	-0.165	-0.060	-0.398	0.181	0.693	0.949	0.941	0.940	0.557	-0.221	-0.194	-0.232	-0.240	-0.066	-0.044	-0.103				
Rb													-0.012	0.114	0.397	-0.325	-0.177	0.425	0.091	0.080	0.113	0.230	-0.224	0.181	-0.292	-0.027	0.253	-0.075	-0.090				
Sr														0.141	0.190	0.477	-0.176	-0.229	-0.154	-0.140	-0.177	-0.402	-0.118	-0.160	-0.182	-0.323	-0.055	-0.067	0.025				
Y															0.095	-0.163	-0.217	-0.310	-0.172	-0.194	-0.220	-0.034	0.310	0.372	0.142	0.162	-0.329	0.343	-0.256				
Cs																-0.124	-0.211	-0.077	-0.037	-0.052	-0.042	-0.160	-0.126	-0.193	-0.215	-0.221	-0.132	-0.075	-0.095				
Hf																	0.390	-0.435	-0.444	-0.440	-0.433	-0.160	0.053	0.190	0.155	0.126	0.289	-0.137	0.618				
Sc																		0.005	0.195	0.214	0.206	0.215	0.046	0.439	0.266	0.224	0.178	-0.141	0.782				
Au																				0.695	0.684	0.685	0.449	-0.252	-0.191	-0.323	-0.180	-0.135	-0.070	-0.113			
As																					0.990	0.994	0.614	-0.217	-0.221	-0.230	-0.170	-0.107	-0.039	-0.064			
Hg																						0.980	0.579	-0.235	-0.239	-0.205	-0.208	-0.147	-0.046	-0.085			
Sb																							0.636	-0.218	-0.213	-0.244	-0.127	-0.013	-0.044	-0.039			
Cu																										-0.137	0.047	0.153	0.097	0.244	-0.018	0.099	
Pb																											0.412	-0.171	0.312	-0.037	0.920	0.081	
Zn																												-0.126	0.387	0.278	0.226	0.523	
Mo																													0.038	-0.093	-0.230	0.047	
Ni																														0.342	0.201	0.344	
Co																															-0.113	0.387	
Cr																																	-0.188

第4表 変質帯ごとの化学成分統計量。S.D.: 標準偏差, その他の略号は第11図と同じ。

Table 4 Statistical numbers for each alteration zone. S.D.: standard deviation, the other abbreviations are the same as in Fig. 11.

	Rhyolite			LA			SZ			ML			K		
	Mean	S.D.	SD/Mean	Mean	S.D.	SD/Mean	Mean	S.D.	SD/Mean	Mean	S.D.	SD/Mean	Mean	S.D.	SD/Mean
%															
SiO ₂	75.10	1.195	0.016	69.00	2.259	0.033	72.71	5.432	0.075	73.09	5.264	0.072	71.68	5.277	0.074
Al ₂ O ₃	12.89	0.562	0.044	13.50	0.444	0.033	12.27	1.053	0.086	12.11	0.742	0.061	15.50	2.642	0.170
Fe ₂ O ₃	1.36	0.156	0.115	2.30	0.563	0.245	1.61	0.547	0.340	2.53	2.230	0.880	2.17	1.218	0.561
MnO	0.10	0.011	0.117	0.11	0.019	0.179	0.02	0.010	0.409	0.03	0.010	0.403	0.01	0.008	0.843
MgO	0.14	0.015	0.112	1.08	0.520	0.482	0.61	0.310	0.508	0.26	0.068	0.259	0.19	0.219	1.154
CaO	0.89	0.107	0.121	0.79	0.192	0.243	1.08	0.955	0.884	0.27	0.422	1.585	0.05	0.044	0.872
Na ₂ O	4.64	0.146	0.031	2.17	0.510	0.236	1.54	0.923	0.598	0.67	0.830	1.242	0.14	0.133	0.974
K ₂ O	2.26	0.516	0.229	3.03	0.199	0.066	2.06	1.414	0.688	4.30	1.713	0.398	0.46	0.406	0.883
TiO ₂	0.11	0.010	0.091	0.22	0.061	0.275	0.17	0.062	0.374	0.15	0.022	0.142	0.33	0.202	0.606
P ₂ O ₅	0.04	0.000	0.000	0.05	0.024	0.529	0.04	0.030	0.796	0.03	0.013	0.516	0.05	0.021	0.446
LOI	2.57	1.549	0.604	7.76	1.272	0.164	7.95	4.933	0.621	6.07	3.651	0.602	9.54	1.967	0.206
total	100.08	0.267	0.003	99.99	0.319	0.003	100.05	0.465	0.005	99.50	0.829	0.008	100.12	0.394	0.004
S	0.03	0.015	0.458	0.07	0.040	0.622	0.23	0.333	1.479	2.16	3.502	1.620	2.23	1.033	0.463
ppm															
Ba	537	20.82	0.04	553	75.44	0.14	465	265.64	0.57	1282	1691.54	1.32	743	692.84	0.93
Rb	64	2.65	0.04	84	15.61	0.19	54	33.97	0.63	135	40.17	0.30	21	12.17	0.58
Sr	74	7.57	0.10	78	21.83	0.28	192	240.22	1.25	56	74.01	1.32	80	73.06	0.91
Y	34	6.08	0.18	31	4.86	0.16	23	5.32	0.23	20	7.26	0.36	12	5.86	0.50
Cs	1	0.92	0.63	3	0.50	0.15	6	2.65	0.48	45	85.78	1.92	3	3.65	1.30
Hf	3	0.00	0.00	4	0.58	0.16	4	1.00	0.29	3	0.71	0.24	4	0.58	0.13
Sc	8	0.21	0.03	12	1.38	0.12	7	1.62	0.23	9	1.72	0.20	12	2.27	0.19
Au(ppb)	1	0.00	0.00	1	0.00	0.00	2	2.60	1.24	58	78.17	1.35	1	0.00	0.00
Ag	2	0.00	0.00	2	0.00	0.00	2	0.00	0.00	2	0.00	0.00	2	0.00	0.00
As	3	0.86	0.30	6	4.51	0.77	16	16.54	1.03	1584	3335.53	2.11	88	80.21	0.92
Hg	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	1	0.80	1.00	5	10.11	2.05	0	0.00	0.00
Sb	1	0.64	0.84	1	0.53	0.87	1	0.58	0.77	44	80.76	1.82	8	4.03	0.50
Cu	4	2.65	0.66	6	1.29	0.23	2	1.41	0.71	12	8.17	0.70	5	3.06	0.57
Pb	89	99.58	1.12	48	13.70	0.29	33	12.69	0.39	21	8.79	0.43	53	17.95	0.34
Zn	79	34.51	0.44	139	31.03	0.22	41	24.74	0.60	57	28.60	0.50	61	49.37	0.81
Mo	2	2.08	1.30	3	1.70	0.60	2	2.23	1.02	2	2.50	1.65	3	1.15	0.43
Ni	4	2.52	0.58	3	1.29	0.52	2	0.58	0.38	2	1.73	0.87	3	3.21	0.96
Co	1	0.81	0.71	4	0.58	0.16	3	1.89	0.66	5	5.54	1.07	6	1.73	0.29
Cr	151	258.65	1.71	6	2.99	0.48	3	1.50	0.55	5	4.77	0.88	6	6.93	1.15
V	2	1.15	0.69	18	8.54	0.48	8	5.20	0.69	8	1.10	0.13	20	12.74	0.63

第5表 変質指標。略号は第11図と同じ。

Table 5 Alteration indices. Abbreviations are the same as in Fig. 11.

Alteration zone	Rhy	LA	SZ	ML	K	A	Whole
Number of samples	3	4	4	5	3	1	20
K ₂ O / Na ₂ O	0.486	1.397	1.332	6.443	3.366	1.354	1.532
K ₂ O / (K ₂ O+Na ₂ O)	0.327	0.583	0.571	0.866	0.771	0.575	0.605
K ₂ O / (K ₂ O+Na ₂ O+CaO)	0.290	0.506	0.439	0.822	0.711	0.500	0.530
K ₂ O / (K ₂ O+Na ₂ O+CaO+MgO)	0.285	0.429	0.389	0.783	0.550	0.442	0.483
Rb / Sr	0.861	1.087	0.280	2.411	0.261	0.582	0.797
Log(100/(CaO+MgO+Na ₂ O))	1.247	1.394	1.490	1.922	2.424	1.772	1.562

スメクタイト・沸石帯とカオリナイト帯が最低値となり、弱変質帯が両者の中間になる。スメクタイト・沸石帯においてCaOの増加に伴ってSrが増加し、かつK₂Oの減少に伴ってRbが減少していることが、同帯の指標値を下げる原因となっている。

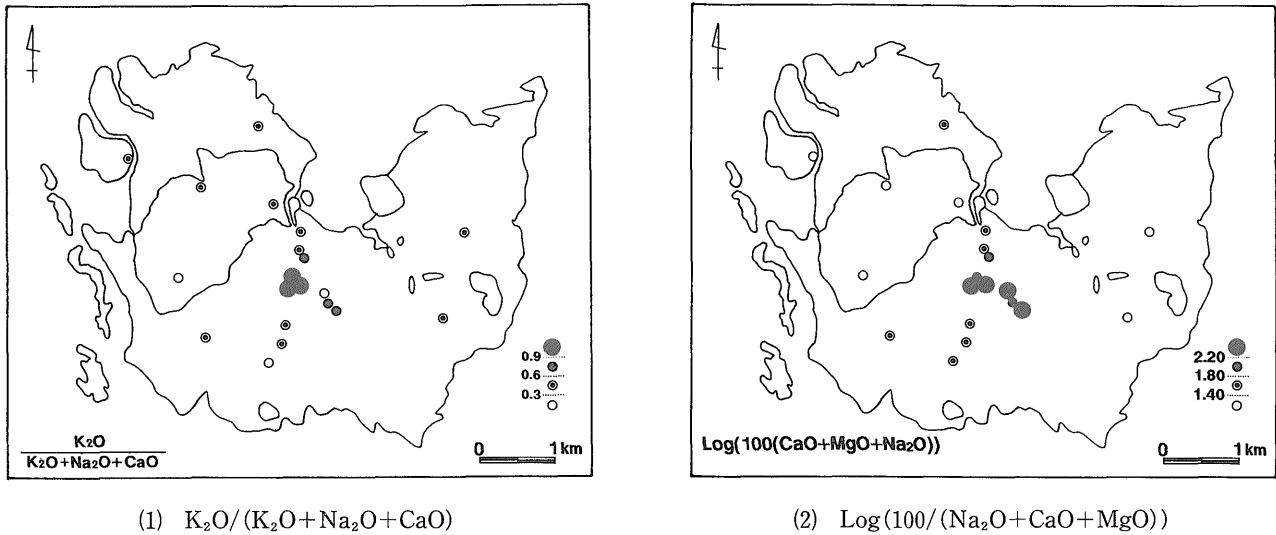
(6) $\log(100/(Na_2O+CaO+MgO))$: 両角ほか(1999)による、強い溶脱作用を伴う強酸性変質にも適用可能な変質指標である。この指標値は、弱変質帯からスメクタイト・沸石帯を経て混合層粘土鉱物帯に向かい順次増加する。また、カオリナイト帯は最高値を、明ばん石帯は混合層粘土鉱物帯に次いで高い値を示す(第21図(2))。砂子原層の変質の化学性状はアルカリ性(スメク

タイト・沸石帯)から強酸性(明ばん石帯)までの広い範囲に及ぶため、溶脱作用をプラスに評価する本指標が砂子原層の変質の実態を最もよく表している。

6. 考 察

6.1 変質に伴う化学成分の挙動

湯の岳流紋岩を除く17試料のうちの16試料は、同一層準である砂子原層湖成層下部層の凝灰岩、凝灰質シルト岩・砂岩およびそれらを原岩とする変質岩であり、弱変質帯の岩石には多量の火山ガラスが含まれる。本研究で分帯した変質帯の間には、鉱物組成、化学組成のいずれ



第21図 主な変質指標値の分布。
Fig. 21 Surface distribution of major alteration indices.

にも互いに違いが見られるが、原岩の岩相は初生および二次堆積物としての火山ガラスを多量に含む凝灰質岩という点で共通しているため、変質岩のもともとの鉱物組成および化学組成の平均も類似していたと考えられる。すなわち、同一層準の異なる変質帯の間に現在認められる鉱物組成や化学組成の差異は、もともと類似した鉱物組成や化学組成をもつ原岩が、地熱活動の影響のもとで種々の性質の流体と相互作用することにより、その鉱物組成や化学組成を変化させたことにより生じたものと考えられる。

上記の前提のもとに、変質に伴う化学成分の移動と変質鉱物生成との関連を考察する。変質に伴う化学成分の出入りを考察するためには、各成分の濃度だけでなく岩石の密度を知り、単位体積当たりの成分含量を算出する必要がある。砂子原層では、変質岩の大部分で原岩の組織が比較的良好に保存されており、変質に伴う岩石の著しい体積変化を示す証拠は認められない。そこで、以下では単位体積当たりの成分含量の差をもってその成分の出入りとみなすこととする。複数試料を分析した弱変質帯、スメクタイト・沸石帯、混合層粘土鉱物帯およびカオリナイト帯について、それぞれの風乾状態での平均岩石密度と平均成分濃度、およびそれらに基づいて算出した単位体積当たりの成分重量を、原岩である弱変質帯の湖成層により基準化した値と合わせて第6表に示す。また、変質帯間での主な変質指標成分の移動度を第22図に示す。

化学分析試料を含む約30試料の自然乾燥状態での岩石密度を測定した結果、カオリナイト帯 (1.45) が最も小さく、弱変質帯 (1.53)、スメクタイト・沸石帯 (1.77)、混合層粘土鉱物帯 (1.81) の順に増加を示した。

単位体積当たり各成分重量を変質帯相互に比較すると、

増減の挙動により、成分はいくつかのグループに分類できる。まず、全ての変質帯を通じて単位体積当たりの重量変化が小さい、すなわち変質に伴う出入りの少ない成分の代表として、最大変化率が10%に満たない Al_2O_3 が挙げられる。 TiO_2 はカオリナイト帯で+42%を示すが、同帯での TiO_2 の変異係数が他の変質帯よりも大きく61%に達することや、主要成分の中では分析の相対誤差が比較的大きいことなどを考えると、全ての変質帯で不変とみなして差し支えないと考えられる。微量元素では、 TiO_2 と同じ Ti 族に属する Hf の最大変化率が20%以下と小さい。 Al_2O_3 は、pH 2 以下の強酸性下でなければ移動せず (Stoffregen, 1987)、また TiO_2 も通常の地熱変質の条件下ではほとんど移動しない成分である。これらの成分の単位体積当たり重量が、測定した全ての変質帯でほぼ等しいという事実は、前提とした考え、すなわち全ての変質帯の原岩の鉱物・化学組成が類似していることと整合する。

次のグループは、弱変質帯からスメクタイト・沸石帯を経て混合層粘土鉱物帯に向かい単位体積当たりの重量が増加する、すなわちアルカリ性～中性変質 (Henley and Ellis, 1983; Hedenquist *et al.*, 1996) に伴って付加の挙動を示す成分である。このグループに属する主要成分は SiO_2 と S である。このうち SiO_2 は、スメクタイト・沸石帯で22%増加するのに対して、より地熱活動の中心に近い混合層粘土鉱物帯における増加率は25%であり、両帯の間に大きな差はない。一方、S はスメクタイト・沸石帯で4倍に増加するのに対し、混合層粘土鉱物帯においては40倍に増加する。すなわち地熱活動の中心に向かって対数的に増加する。同様の傾向は微量元素の Cs, Au, As, Hg, Sb などに認められる。また、Ba もこの順で増加する傾向をもつ。スメクタイト・沸石帯と混合層粘土

第6表 各変質帯の単位体積当たり成分重量。略号は第11図と同じ。

Table 6 Key component weight per unit volume for each alteration zone. Abbreviations are the same as in Fig. 11.

Alterat'n zone n (analysed) Specific wt.	LA		SZ				ML		K		
	4		4		SZ/LA	5		ML/LA	3		K/LA
	1.53		1.77			1.81			1.45		
	wt%	g/l	wt%	g/l		wt%	g/l		wt%	g/l	
SiO ₂	69.00	1055.7	72.71	1287.0	1.22	73.09	1322.9	1.25	71.68	1039.4	0.98
Al ₂ O ₃	13.50	206.5	12.27	217.1	1.05	12.11	219.1	1.06	15.50	224.8	1.09
Fe ₂ O ₃	2.30	35.1	1.61	28.5	0.81	2.53	45.9	1.31	2.17	31.5	0.90
MnO	0.11	1.6	0.02	0.4	0.26	0.03	0.5	0.28	0.01	0.1	0.09
MgO	1.08	16.5	0.61	10.8	0.65	0.26	4.7	0.29	0.19	2.8	0.17
CaO	0.79	12.1	1.08	19.1	1.58	0.27	4.8	0.40	0.05	0.7	0.06
Na ₂ O	2.17	33.1	1.54	27.3	0.82	0.67	12.1	0.37	0.14	2.0	0.06
K ₂ O	3.03	46.3	2.06	36.4	0.79	4.30	77.9	1.68	0.46	6.7	0.14
TiO ₂	0.22	3.4	0.17	3.0	0.87	0.15	2.8	0.81	0.33	4.8	1.42
P ₂ O ₅	0.05	0.7	0.04	0.7	0.96	0.03	0.5	0.68	0.05	0.7	0.98
LOI	7.76	118.8	7.95	140.7	1.18	6.07	109.8	0.92	9.54	138.3	1.16
total	99.99	1529.8	100.05	1770.9	1.16	99.50	1801.0	1.18	100.12	1451.7	0.95
S	0.07	1.0	0.23	4.0	4.00	2.16	39.1	39.35	2.23	32.4	32.56
	ppm	mg/l	ppm	mg/l		ppm	mg/l		ppm	mg/l	
Ba	553	845	465	823	0.97	1282	2320	2.75	743	1078	1.28
Rb	84	129	54	95	0.74	135	244	1.90	21	30	0.24
Sr	78	119	192	340	2.87	56	101	0.85	80	116	0.98
Y	31	47	23	40	0.86	20	37	0.78	12	17	0.36
Cs	3	5	6	10	1.96	45	81	16.23	3	4	0.82
Hf	4	5	4	6	1.16	3	5	1.01	4	6	1.17
Sc	12	18	7	13	0.70	9	15	0.86	12	17	0.96
Au (ppb)	1	1	2	4	3.04	58	105	85.59	1	1	0.95
As	6	9	16	28	3.17	1584	2867	318.99	88	127	14.14
Hg	0	1	1	1	2.31	5	9	14.55	0	1	0.95
Sb	1	1	1	1	1.42	44	80	85.91	8	12	12.64
Cu	6	8	2	4	0.42	12	21	2.50	5	8	0.92
Pb	48	73	33	58	0.79	21	37	0.51	53	76	1.05
Zn	139	212	41	73	0.34	57	104	0.49	61	88	0.41
Mo	3	4	2	4	0.89	2	3	0.63	3	4	0.89
Ni	3	4	2	3	0.69	2	4	0.95	3	5	1.26
Co	4	5	3	5	0.94	5	9	1.76	6	9	1.62
Cr	6	10	3	5	0.51	5	10	1.02	6	9	0.91
V	18	27	8	13	0.49	8	15	0.55	20	29	1.09

鉱物帯における SiO₂の付加は熱水性石英の沈殿に対応し、両帯の単位体積当たりの重量増加に最大の寄与をしている。地熱系の中心に向かう S の急増は、主として黄鉄鉱の生成に対応づけられる。混合層粘土鉱物帯における Au, As, Hg, Sb など非揮発性成分を含む浅熱水性元素群の付加は、それらが深部の貯留槽から液相状態で上昇してきた流体によりもたらされたことを示唆する。

逆に、弱変質帯からスメクタイト・沸石帯を経て混合層粘土鉱物帯に向かい単位体積当たりの重量が減少する、すなわちアルカリ性～中性変質の進行に伴って除去の挙動を示す成分としては、主要成分では MnO, MgO, Na₂O が、微量成分では Zn がある。これは、有色鉱物の粘土鉱物化や斜長石のカリ長石化に対応づけられる。

スメクタイト・沸石帯で単位体積当たりの重量が減少するが、混合層粘土鉱物帯では増加する、すなわち相対的に低温のアルカリ性変質帯で除去、相対的に高温の中性変質帯で付加の挙動を示す成分としては、主要成分では Fe₂O₃, K₂O が、微量成分では Rb, Cu がある。この

Fe₂O₃, K₂O の挙動は、黄鉄鉱、カリ長石の消長と対応づけられる。

逆に、スメクタイト・沸石帯で単位体積当たりの重量が増加するが、混合層粘土鉱物帯では減少する挙動を示す成分としては、主要成分では CaO が、微量成分では Sr がある。この CaO の挙動は、沸石鉱物の消長と対応づけられる。

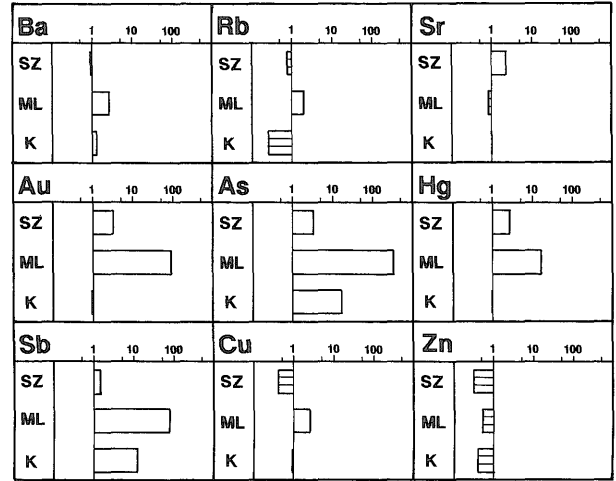
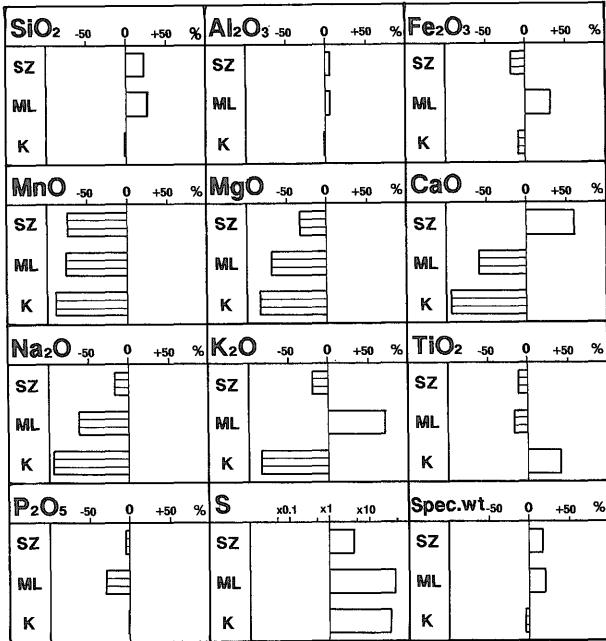
一方、酸性変質帯であるカオリナイト帯 (Henley and Ellis, 1983; Hedenquist et. al, 1996) での成分の出入りをみると、主要成分では SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, P₂O₅ が +/-10% でほぼ不変であり、TiO₂ も既述の理由により不変とみなして差し支えない。それに対して MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O は原岩の 80-90% 以上が失われ、大幅な除去となっている。その逆に、S は 33 倍と増加し大幅な付加となっている。微量成分では、Sr, Cs, Hf, Sc, Au, Cu, Pb や Ba, Hg などの浅熱水性元素の一部がほぼ不変であるのに対して、浅熱水性元素である As と Sb が 10 倍以上に増加、また Rb, Y, Zn は原岩の 30% 前後に減少

している。アルカリ・アルカリ土類元素の大幅な除去は、酸性地下水による溶脱を示すが、 Al_2O_3 は移動していないことから、その pH は約 2 以下ではない。硫酸酸性水による変質を示す明ばん石が認められないことから、炭酸酸性による pH 4 前後の地下水による酸性変質 (Heden-

quist, 1990) であった可能性が高い。

6.2 変質の特徴と地形・地質・水理等との関連

砂子原層の各変質帯の物性、鉱物組成および化学組成上の変化は、弱変質帯相当の岩石を原岩として変質が進行したと考えると、第7表のようにまとめられる。以下では、砂子原層に見られる変質帯の多様性や空間分布の特徴が、地形(第4図)、原岩の特徴、地下の温度分布(第23図)や水理・地質構造、地熱流体の化学的特徴などと、



(1) 主要成分 (major component) : 基準線より左向きの平行線帯は除去, 右向きの白ぬき帯は付加の割合をそれぞれ%で示す。硫黄のみ対数表示。

(2) 微量成分 (minor component) : 基準線より左向きの平行線帯は除去, 右向きの白ぬき帯は付加の割合をそれぞれ示す。全て対数表示。

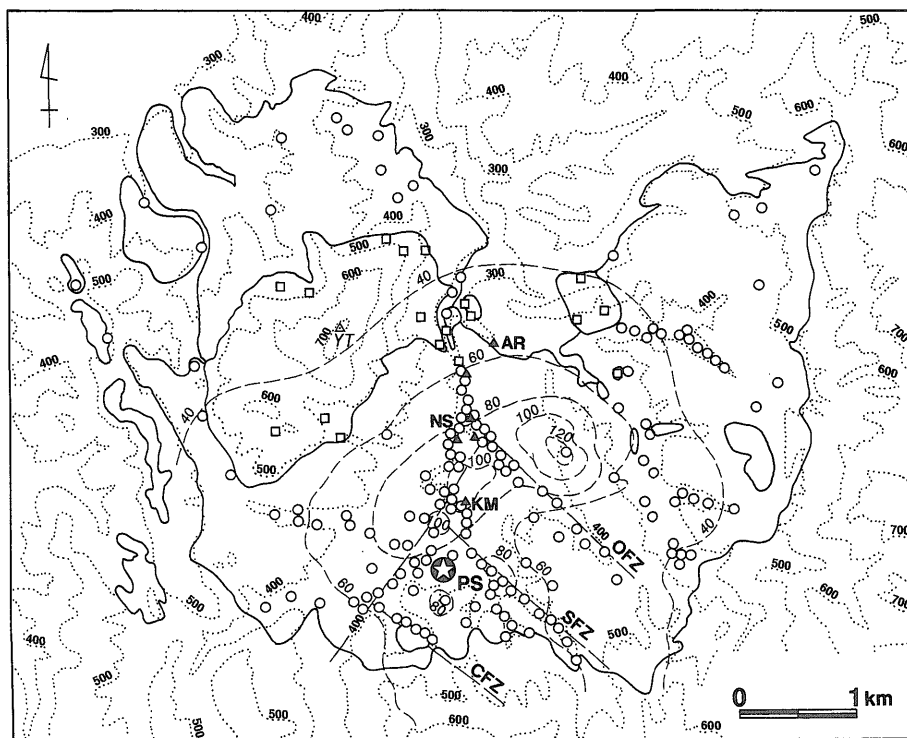
第22図 弱変質帯を基準にした変質帯間での化学成分移動度。

Fig. 22 Gains and losses of key components for each alteration zone compared to the least-altered zone.

第7表 変質による物性、鉱物組成、化学組成変化のまとめ。

Table 7 Change of physical properties, mineral and chemical compositions for each alteration zone compared to the Least-altered zone.

変質帯	スメクタイト沸石帯	混合層粘土鉱物帯	カオリナイト帯	明ばん石帯
物性変化	密度増加 やや硬化~硬化	密度増加 硬化	密度減少 軟化 含水比増加 (一部)	密度減少 脆弱化
鉱物組成変化	生成 石英, カリ長石 スメクタイト モルデン沸石 斜ブチロル沸石	石英, カリ長石 イライト・スメクタイト混合層鉱物, 黄鉄鉱	石英, カオリナイト 黄鉄鉱	石英, 明ばん石 クリストバライト
	消費 火山ガラス	火山ガラス 斜長石 (一部)	火山ガラス, 斜長石	火山ガラス, 斜長石
化学組成変化	増加 SiO_2 , CaO , S Sr, Au, As, Hg	SiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O S, Ba, Rb, Au, As Hg, Sb, Cu	S As, Sb	
	減少 Fe_2O_3 , MnO, MgO Na_2O , K_2O Cu, Zn	MnO, MgO, CaO Na_2O , P_2O_5 Zn	MnO, MgO, CaO Na_2O , K_2O Rb, Zn	



第23図 砂子原層分布域の地形、地下温度分布、温泉分布 (NEDO (1985), 関・安達(1997), 水垣(1993)より編図)。実線：砂子原層分布境界、点線：地形等高線(100m毎)、破線：海水準+200m面における等温線(20°C毎)、PS：西山柳津地熱発電所、AR：荒湯温泉、NS：西山温泉、KM：神の湯温泉。

Fig. 23 Topography (dotted line), distribution of underground temperatures at ASL+200 m (broken line) and locations of hot springs around the distribution area of the Sunagohara Formation. PS: Yanai-geothermal power station, AR: Arayu hot spring, NS: Nishiyama spa and KM: Kaminoyu.

どのように関連づけられるかについて考察する。

地形と変質帯分布との関係を見ると、滝谷川とその支流の老沢、猿倉沢に沿う低地に混合層粘土鉱物帯、カオリナイト帯、明ばん石帯などランクの高い変質帯が分布する。弱変質帯からスメクタイト・沸石帯を経て混合層粘土鉱物帯、イライト・緑泥石帯に向かい、雲母粘土鉱物はスメクタイトからイライト・スメクタイト混合層鉱物を経てイライトへと、より高温のタイプへ連続的に変化する。これらの変質帯が形成された時期の地下の温度構造が、現在と同様に緩やかなドーム状構造(第7図)をもっていたとすれば、それら変質帯の分布も温度構造と調和したドーム構造をなすと考えられる。実際に、地熱地域の坑井で見られるスメクタイト・沸石帯の下限は深度100m前後であり(第15図)、坑口高度と滝谷川河床との高度差が100m前後であることから、滝谷川から地熱生産ゾーン上部にかけての同帯の下限はほぼ水平に分布していることになる。したがって、地表における混合層粘土鉱物帯の分布が、地熱活動の中心に近い所で地形的低所に比較的広範囲に現れるのは、同変質帯が現在と同様のドーム状の地温構造と調和して形成されたのち、地形面が切り込まれたためであろう。本地域においては滝谷川の下刻作用が卓越しているため、混合層粘土鉱物帯の地表分布も滝谷川に沿う形態となっている。なお、現在地表に分布する混合層粘土鉱物帯の特徴鉱物であるカリ長石やイライト・スメクタイト混合層鉱物から推定される温度は150-200°C (Henley and Ellis, 1983; Reyes, 1990)であるのに対して、現在の地温は地下約100mにおいてもたかだか120°Cに過ぎない(第23図)。このことは

混合層粘土鉱物帯ほかの変質帯が形成された後に、少なくとも地熱系浅所の地下温度が数10°C低下してきたことを示唆している。

一方、滝谷川とその主要な支流である老沢、猿倉沢、血の池沢はいずれも坑井で認められた断層ないし裂か系の地表延長部に位置し、それらの水系自体が断層や裂かなどの弱線に従ったものである可能性が高い。老沢北西部に分布するカオリナイト帯の地下には、現在地熱発電の還元ゾーンとして使用されている、地熱系で最大の飲み込み容量をもつ老沢フラクチャーゾーンが位置する。また柳津西山地熱発電所の西側に分布する明ばん石帯の地下は、地熱発電の生産ゾーンのひとつである猿倉沢フラクチャーゾーンと滝谷川断層との交会部に相当する。いずれの変質帯も地表での分布面積が小さく、かつ分布はそれぞれ1箇所に限られる。これらのことから、カオリナイト帯と明ばん石帯の形成にとって、それらの地下に存在する地熱流体の貯留部と連絡するフラクチャー、およびそれらのフラクチャーを上昇した地熱流体の化学的性質が大きな規制要因であったと考えられる。

各変質帯の形成に関与した地熱流体の化学的特徴は、それらの鉱物組合せからスメクタイト・沸石帯がアルカリ性~中性pH、混合層粘土鉱物帯が中性pH、カオリナイト帯が酸性、明ばん石帯が硫酸酸性水であったと考えられる(Henley and Ellis, 1983; Reyes, 1990)。変質帯の分布様式と関与した流体の化学性状との関係を見ると、アルカリ性~中性pHでより高温の特徴を持つ混合層粘土鉱物変質帯は、西山温泉や神の湯の周辺の滝谷川に沿って分布し、より低温のスメクタイト・沸石帯はそれ

らを中心に約 5 km²の大きな平面的広がりをもつ。このことは、両変質帯が、西山温泉付近の滝谷川沿いに上昇してきた中性熱水を起源とする流体が、間隙に富み透水性の高い湖成碎屑岩中を反応しながら側方へ移動することにより形成されたと考えることで理解できる。一方、カオリナイト帯と明ばん石帯は分布がフラクチャーに強く規制されている。このことは、それらの変質帯の形成においてガスが重要な役割を担っていたことを示唆する。なぜなら、フラクチャーに規制されて上昇する地熱流体が沸騰した場合、それにより生じたガスはその強い浮力のために液相と異なり水平方向にはほとんど移動せず、フラクチャーに沿って最短距離を上昇すると考えられるからである。変質鉱物組合せから予想される流体の化学性状や pH についても、カオリナイト帯が CO₂ ガスに飽和した pH 4 前後の酸性地下水により、また明ばん石帯が H₂S ガスの酸化で生じた pH 2~3 の硫酸酸性水により形成されたと説明することが可能である (Hedenquist *et al.*, 1996)。このことは、現在の奥会津地熱系の貯留槽深度における地熱流体が CO₂ や H₂S ガスに富むことと調和している。ただし、どのような理由でフラクチャーの特定の場所に、特定のガスに富む流体が集中したのかについては、今後明らかにする必要がある。

最後に、これらの変質帯の形成史について考える。地表の変質帯分布 (第12図) からは、カオリナイト帯と明ばん石帯が、スメクタイト・沸石帯や混合層粘土鉱物帯を切るように分布しており、後者が前者の後に生起したことが示唆される。また、坑井データ (関・安達, 1997) と合わせて見ると、スメクタイト・沸石帯や混合層粘土鉱物帯が平面的に広範囲に分布するのに対して、カオリナイト帯と明ばん石帯の分布面積は前者の1/20~1/50程度であり、出現範囲は局限されている。これらの事実に対するひとつの解釈を述べる。まず、スメクタイト・沸石帯と混合層粘土鉱物帯は、カルデラ湖の水位が高く湖成層の大部分が地下水で飽和された条件の下で、地下温度構造に規制されつつ透水性の高い湖成層の広範囲に形

成された。ついで、カルデラ湖の水位が低下した後、カオリナイト帯と明ばん石帯が、それぞれの直下のフラクチャーゾーン内部における地熱流体の沸騰で解放された CO₂ と H₂S ガスが浅層地下水に吹き込むことにより生じた炭酸酸性水と硫酸酸性水により形成された。

上記の考察と、坑井データ (関・安達, 1997) および本研究で明らかになった地表のデータに基づいて描いた、砂子原層にみられる変質帯の模式的な分布断面を第24図に示す。

7. ま と め

奥会津地熱地域・砂子原層の変質は、以下のとおりまとめられる。

(1) 砂子原層の変質は、特徴的に認められる変質鉱物の組合せにより、以下の6帯に分帯される。

I : 弱変質 (LA) 帯...残存火山ガラス

II : スメクタイト・沸石 (SZ) 帯...スメクタイト, モルデン沸石, 斜プチロル沸石

III : 混合層粘土鉱物 (ML) 帯...カリ長石, イライト/スメクタイト混合層粘土鉱物

IV : イライト・緑泥石 (IC) 帯...イライト, 緑泥石

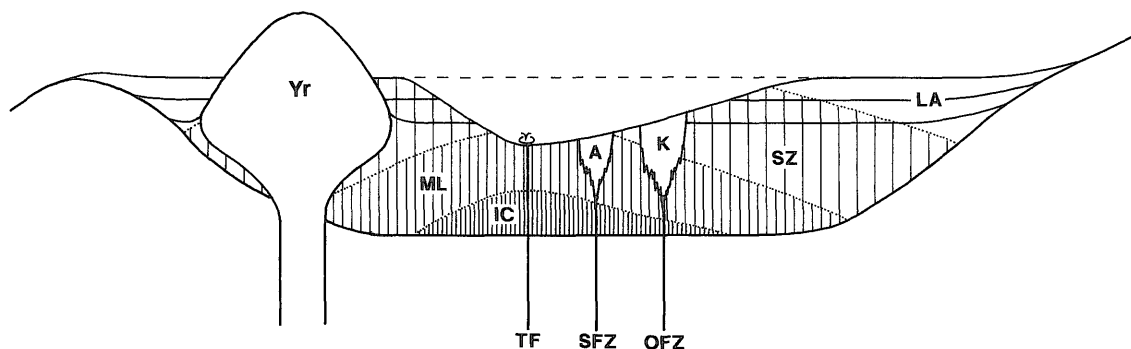
V : カオリナイト (K) 帯...カオリナイト

VI : 明ばん石 (A) 帯...明ばん石, クリストバライト

(2) 地熱活動の中心地域の地下にイライト・緑泥石帯が、その地表に混合層粘土鉱物帯が、その周辺の地表にスメクタイト沸石帯が、さらにそれを取りまいて弱変質帯が累帯配列する。カオリナイト帯と明ばん石帯は、混合層粘土鉱物帯とスメクタイト沸石帯の分布に重なって小規模に出現する。

(3) 弱変質帯を基準として単位体積当たりの化学成分量の増減を計算すると、変質に伴う化学成分の出入りは以下のとおりである。

スメクタイト・沸石 (SZ) 帯 : SiO₂, CaO, S の付加, MnO, MgO の除去。



第24図 砂子原層の模式変質断面, 方向, 縮尺は任意。略号は第2, 11図と同じ。

Fig. 24 Generalized cross-section showing underground distribution of alteration zones. Abbreviations are the same as in Figs. 2 and 11.

混合層粘土鉱物 (ML) 帯: SiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O , S, Au, As, Hg, Sb の付加, MnO , MgO , CaO , Na_2O の除去。

カオリナイト (K) 帯: S, As, Sb の付加, MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O の除去。

(4) これらの化学成分の出入りは, 変質鉱物の調査結果と以下のとおり対応づけられる。SZ 帯と ML 帯における熱水性石英の付加・有色鉱物の粘土鉱物化, 火山ガラスの SZ 帯における沸石化と ML 帯におけるカリ長石化, ML 帯における斜長石の粘土鉱物化・カリ長石化および黄鉄鉱や浅熱水性元素群に富む硫化物の沈殿, 火山ガラスや斜長石の K 帯におけるカオリナイト化・A 帯における明ばん石化。

(5) これらの変質帯の多様性や空間分布の特徴は, 砂子原層の地形, 原岩の特徴, 地下の温度分布や水理・地質構造, 地熱流体の化学的特徴などと以下のように関連づけることができる。スメクタイト・沸石帯から混合層粘土鉱物帯を経てイライト・緑泥石帯に至る累帯配列するアルカリ性～中性 pH の変質帯については, 主として滝谷川断層を上昇してきた中性熱水が, 透水性の高い湖成碎屑岩中を水平方向に温度低下しつつ移動することにより, 西山温泉を中心とする広範囲に形成された。フラクチャーに規制されて分布するカオリナイト帯と明ばん石帯は, それぞれ沸騰により生じた CO_2 ガスに飽和した酸性地下水, および H_2S ガスの酸化で生じた硫酸酸性水により, 沸騰箇所近傍に局在して形成された。

(6) 複数の変質指標を比較適用した結果, アルカリ性から強酸性までの様々なタイプの変質が現れる砂子原層では, 両角ほか (1999) による指標である $\log(100/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}))$ が最適であることがわかった。

謝辞 安達正敏氏, 井上啓二氏, 横本誠一氏をはじめとする奥会津地熱株式会社および三井金属鉱業株式会社の関係各位には坑井資試料の提供など種々の便宜を計って頂いた。当所首席研究官松久幸敬博士には奥会津地熱系の研究を始める機会を用意して頂き, 同資源エネルギー地質部青木正博 博士および元同資源エネルギー地質部 J. W. Hedenquist 博士からは多くの御教示を頂いた。田中ひとみさんには図表作成を手伝って頂いた。また, 1999 年資源地質学会秋季講習会参加者の方々からは, 現地でも有益な議論をして頂いた。以上の方々には深謝申し上げる。

文 献

早川典久, 鈴木舜一, 小田幸人 (1977) 会津地方新第三系の続成および熱水変質. 鉱山地質, 27, 367-378.

Hedenquist, J. W. (1990) The thermal and geochemical structure of the Broadlands-Ohaaki

geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, 19, 151-185.

Hedenquist, J. W., Izawa, E., Arribas, A. Jr. and White, N. C. (1996) Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *Soc. of Res. Geol., Spec. Public.* no. 1.

Henley, R. W. and Ellis, A. J. (1983) Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review. *Earth-Science Reviews*, 19, 1-50.

北村 信, 菅原祐輔, 鈴木養身, 藤井敬三, 伊藤 修, 高橋清治 (1968) 福島県地質調査報告, 宮下地域の地質. 福島県. 21p.

小室裕明 (1978) 会津柳津地方における後期中新世陥没盆地の形成について. 地球科学, 32, 68-83.

両角春寿, 目次英哉, 北 良行 (1999) 浅熱水性金鉱床に関する地化学探査技術の開発. 資源地質, 49, 217-225.

水垣桂子 (1993) 砂子原カルデラの構造と火山活動史. 地質学雑誌, 99, 721-737.

NEDO (新エネルギー総合開発機構) (1985) 地熱開発促進調査報告書. no.8, 奥会津地域, 811p.

新田富也, 寿賀祥五, 塚越重明, 安達正敏 (1987) 福島県奥会津地域の地熱資源について. 地熱, 24, 340-370.

新田富也, 安達正敏, 高橋幹男, 井上啓二, 阿部泰行 (1991) 福島県奥会津87N-15T 坑井地熱流体からの重金属鉱物の沈澱について. 鉱山地質, 41, 231-242.

新田富也, 塚越重明, 安達正敏, 瀬尾邦夫 (1995) 福島県奥会津地帯の探査とその開発. 資源地質, 45, 201-212.

大賀啓行 (1992) 奥会津地域における地熱井掘削実績, 地熱, 29, 203-221.

Reyes, A. G. (1990) Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Jour. Volcano. Geother. Res.*, 43, 279-309.

Seki, Y. (1990) Gas concentration in aquifer fluid prior to boiling in the Oku-aizu geothermal system, Fukushima, Japan. *Geochem. Jour.*, 24, 105-121.

Seki, Y. (1991) The physical and chemical structure of the Oku-aizu geothermal system, Japan. *Geochem. Jour.*, 25, 245-265.

関 陽児 (1996) 奥会津地熱系の地熱流体の地球化学的特徴. 地調月報, 47, 273-289.

関 陽児, 安達正敏 (1997) 奥会津地熱地域の層序と熱水変質—坑井データに基づく検討—. 地調

- 月報, 48, 365-412.
- Stoffregen, R. (1987) Genesis of acid-sulfate alteration and Au-Cu-Ag mineralization at Summitville, Colorado. *Econ. Geol.*, **82**, 1575-1591.
- 鈴木敬治, 吉田 義 (1956) 会津盆地西南縁地域の第三系・第四系について. *地質学雑誌*, **62**, 161-176.
- 鈴木敬治, 島津光夫, 島田 朗, 真鍋健一 (1986) 北村 信編“新生代東北本州弧地質資料集”第3巻, 島弧横断ルート no.28 (柏崎-守門岳-只見-会津若松-郡山), 宝文堂.
- 高橋 洋 (1988) 細倉鉱床の鉱化変質分帯と生成モデル. *鉱山地質*, **38**, 335-346.
- 高鳥薫朗, 南野正彦 (1985) 千歳鉱山福神沢鉱床の地化学的特性: 金銀鉱床探査指針確立のためのアプローチ. *日本の金銀鉱石第3集*, 19-60.
- 谷田勝俊, 駒形貞嗣, 水戸研一 (1964) 福島県柳津町砂子原の耐火粘土. *東北の工業用鉱物資源* (4), 114-121.
- 通商産業省 (1970) 昭和44年度広域調査報告書, 西会津地域.
- 通商産業省 (1978) 地熱開発基礎調査報告書 No.5 西山そのII, 80p.
- 山元孝広 (1992) 会津地域の後期中新世-更新世カルデラ火山群. *地質学雑誌*, **98**, 21-38.
- 山元孝広 (1995) 沼沢火山における火砕流噴火の多様性: 沼沢湖および水沼火砕流堆積物の層序. *火山*, **40**, 67-81.
- 山元孝広 (1996) テフラ層序からみた磐梯火山の噴火活動史. *地調月報*, **47**, 335-359.

(受付: 2000年5月2日; 受理: 2000年6月26日)

奥会津地熱地域・更新統砂子原層にみられる変質 (関)

付表 (続き)
Appendix (Continued)

Sample No.	code	Qz	Cr	Pl	Kf	Ct	Md	Sm	Ka	Ha	Al	Il	Ch	I/S	C/S	Cc	Dl	Sd	Kt	Rd	Py	Js	Sp	Gp	Su	Hb	Bt	gls	Remarks
87N15T-80		4			2											3						2							
87N15T-120		4			2																2	2		1					
87N15T-180		4			2												2	2					2	1					
87N18t-20		4	3		2			2	2													2							
87N18t-40		4								4												2						1	
87N18t-80		4							2																				
87N18t-120		4		2	2		3																						
87N18t-160		4			3											1							1						
87N18t-220		4		2	2		4																						
87N18t-260		4			3																		2						
88N19R-20		4	1	3		1	2	2				2	2																
88N19R-60		4	1	3	2	1	2	2				1	2									1							
88N19R-120		4	2	3	1	2	3	2				2	1																
88N19R-180		4			2		3	2	2			1										2							
88N19R-260		4		4	2			1	1			1				1						1							
88N22T-20		4	2	3	2	1	2	1														1			2				
88N22T-80		4		3		4	2	2				1																	
88N22T-140		4			4	2		2				1	1			4						1			1				
88N22T-220		4		4	2		2	2				1	1			1						1							
92N28P-20		4			2		3															1			2				
92N28P-40		4		2	2		3							1								2			1				
92N28P-80		4		4	2		1	1	1			1	1									2							
92N28P-120		4		1	3		1	1	1													2							
92N29R-40		4	3	4	2	2		1														1						1	
92N29R-100		4		2		1	2	2								2													
92N29R-200		4		3	2	3	1	2				1				1													
92N29R-340		4		4	2							2	2				1					3							

鉱物の相対量； 4：多量， 3：中量， 2：少量， 1：微量。

略号； Qz：Quartz (石英)， Cr：Cristobalite (クリストバライト)， Pl：Plagioclase (斜長石)， Kf：K-Feldspar (カリ長石)， Md：Mordenite (モルデン沸石)， Ct：Clinoptilolite (斜アチロル沸石)， Il：Illite (イライト)， Ch：Chlorite (緑泥石)， Ka：Kaolinite (カオリナイト)， Ha：Halloysite (ハロイサイト)， Sm：Smectite (スメクタイト)， I/S：Illite-Smectite mixed-layered (イライト・スメクタイト混合層鉱物)， C/S：Chlorite-Smectite mixed-layered (緑泥石・スメクタイト混合層鉱物)， Hb：Hornblende (角閃石)， Cc：Calcite (方解石)， Dl：Dolomite (苦灰石)， Sd：Siderite (菱鉄鉱)， Gp：Gypsum (石膏)， Al：Alunite (明ばん石)， Js：Jarosite (鉄明ばん石)， Py：Pyrite (黄鉄鉱)， Op：Orpiment (雄黄)， Su：Sulfur (硫黄)， gls：glass (ガラス)。