

Colorado 州 Western San Juan 山地の変質作用及び鉱化作用にみられる天水の寄与

松久 幸敬*

Some New Data on Low- ^{18}O Igneous Rocks and Minerals
from the Western San Juan Mountains, Colorado

Yukihiro MATSUHISA

Abstract

$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios were measured for three igneous rocks and two quartz samples from the Western San Juan Mountains, Colorado. The three igneous rocks were collected from the same outcrops as those examined by TAYLOR (1974b). The whole-rock $\delta^{18}\text{O}$ values relative to SMOW are +1.5‰ for Treasure Mountain rhyolite (# 8), -3.1‰ for Burns Formation quartz latite (# 10), and -5.6‰ for a granodiorite porphyry (# 12). These results are in accord with those by TAYLOR (1974b) within $\pm 1\%$, being explained by oxygen isotopic exchange with heated meteoric ground water. Fluctuation of $\pm 1\%$ between TAYLOR (1974b) and the present results would partly be due to isotopic heterogeneity in the outcrops depending upon degree of isotopic exchange with meteoric ground water. A vein quartz (# 13) collected from the chloritized granodiorite porphyry (# 12) has a $\delta^{18}\text{O}$ value of -4.1‰. This indicates that the hydrothermal solution responsible for the precipitation of vein quartz as well as the alteration of host rock was originated from, or at least dominant in meteoric ground water.

A $\delta^{18}\text{O}$ value of -5.1‰ is obtained for an euhedral quartz crystal (# 15) lining the wall of a cavity in the Idarado Mine (Black Bear Vein), which is one of the radial veins developed in northwestern flank of the Silverton Caldera. Homogenization temperatures of 255° to 300°C are obtained for fluid inclusions in this quartz crystal. Judging from the mode of occurrence, the fluid inclusions showing the homogenization temperatures around 255°C are presumed to be secondary inclusions. If 300°C is accepted for the temperature, a $\delta^{18}\text{O}$ value of -12‰ is calculated for the hydrothermal water which would have been equilibrated with the quartz during mineralization. This $\delta^{18}\text{O}$ value is somewhat higher than the value of -16‰ for the meteoric ground water in the area estimated by TAYLOR (1974b) on the basis of hydrogen isotopic compositions of hydrous minerals. This implies that the meteoric hydrothermal water might have undergone an ^{18}O shift by means of isotopic exchange with wall rocks prior to the precipitation of the quartz in the later stage of mineralization. The fact that the quartz from the Idarado Mine is much depleted in ^{18}O than the vein quartz from the Gold King Mine within the caldera (+2.2‰, TAYLOR, 1974b) suggests that the hydrothermal system in the radial fissure zone outside the caldera was much abundant in meteoric ground water, or had higher water to rock ratio than the system prevalent within the caldera.

1. はじめに

H. P. TAYLOR, JR. と彼の共同研究者たちは、浅所に貫入した火成岩体とその周囲の岩石が著しく ^{18}O に乏しくなっている多くの例を見だし、これを、熱水条件下で岩石が天水起源の水と反応した結果であると説明した (たとえば、TAYLOR, 1971, 1974a; TAYLOR and FORESTER, 1971). このような天水起源の水と岩石との反応は、ポー

フリー・カップー鉱床や浅熱水性金銀鉱床においてもみられ、これらの鉱床の熱水鉱化溶液に対する天水の寄与が注目されている (GARLICK and EPSTEIN, 1966; SHEPPARD *et al.*, 1971; O'NEIL *et al.*, 1973; TAYLOR, 1973). わが国でも、筆者と共同研究者は、同様の観点から浅成火成岩体の酸素同位体組成について予察的研究を行い、中国地方の花崗岩類や古第三紀のカルデラにおいて、天水起源の熱水が岩石と反応している例を見いだした (石原・松久, 1975, 1977; 今岡ほか, 1977).

* 鉱床部

Colorado 州南西部の San Juan 山地では、第三紀中頃の活発な火山活動とそれにひきつづく構造運動と火成岩体の貫入に伴って、金・銀・鉛・亜鉛・銅を含む、中熱水性の鉱化作用が生じている (RIDGE, 1972, p.317-323). FORESTER and TAYLOR (1972) および TAYLOR (1974b) は、この地域の岩株状小貫入岩体とその周囲の火山岩類の酸素および水素同位体組成を測定し、貫入岩体によって加熱された地下水が貫入岩体の周辺を大規模に循環し、周囲の岩石と同位体交換反応を行ったことを示した。

筆者は、わが国の熱水変質作用を研究する際の参考とするため、Western San Juan 山地を訪ねた際に TAYLOR (1974b) と同じ露頭で採集したいくつかの試料について酸素同位体組成測定の実験を行い、さらに、花崗閃緑斑岩中の石英脈と、鉱床中の石英の自形結晶について新たに酸素同位体組成を測定したのでここに報告し、鉱化溶液に対する天水の寄与について考察する。

2. 地質の概要

San Juan 山地は Colorado 州南西部に位置し、主として第三紀火山岩類からなる直径 150 km 以上にわたるドーム状の隆起地である。この地域の地質については、LARSEN and CROSS (1956) によって詳細な研究が行われている。火山活動の時期は、漸新世末から鮮新世初にわたるが、その主要な時期は中新世である。山地の北部と西部では、先カンブリア紀の岩石と、古生代から第三紀にわたる堆積岩が露出している。

本報文の対象となる Western San Juan 山地は、San Juan 山地の西端を占める Silverton Caldera を中心とする地域である (Fig. 1)。この地域の第三紀火山岩類は、カルク・アルカリ岩系熔岩、凝灰角礫岩、凝灰岩からなり、噴出物の総計は、厚さ約 2.5 km、容積約 4000 km³ に及ぶとみられる (LUEDKE and BURBANK, 1968)。LUEDKE and BURBANK (1968) によれば、この地域における

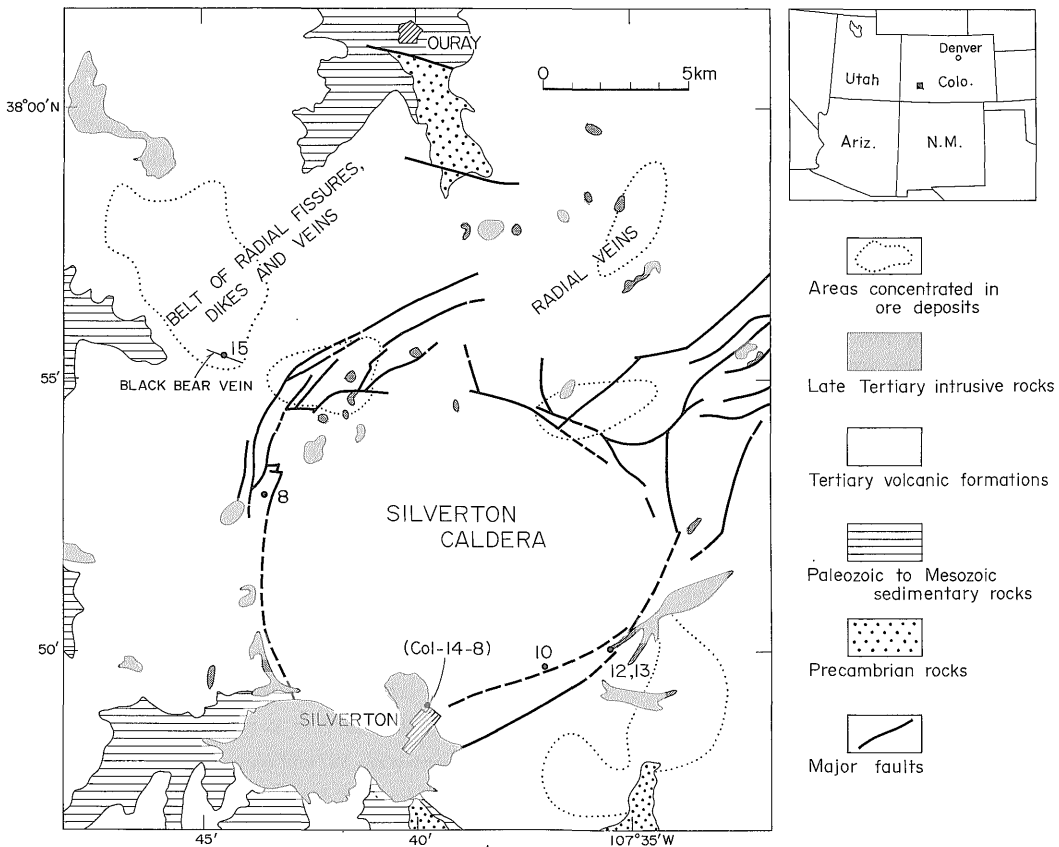


Fig. 1 Generalized geologic map of the Western San Juan Mountains, Colorado (after BURBANK, 1950). Numbers in the map indicate sampling locations for the present study. The sample number in parentheses is that taken from TAYLOR (1974b).

第三紀の火山活動は、火山噴火とそれにひきつづく火道地域の陥没を一つの単位として、3つの時期に分けられる。Silverton Caldera は、それらのうちの最後の時期に、大量の火山灰の放出にひきつづいて形成された陥没である。カルデラ形成後この地域は、火成岩の貫入を受けて中央部がドーム状に隆起し、放射状および同心円状の割れ目や岩脈が形成された。Silverton Caldera の周辺の貫入岩体や割れ目、岩脈の分布は、地下のマグマ溜りが上部の陥没よりも大きかったことを示唆している (LUEDKE and BURBANK, 1968)。

上記の火成岩体の貫入後に、岩脈や割れ目にそって鉍化作用が生じた。Silverton Caldera の外側では、鉍体は放射状の割れ目をみたま脈の中に形成され、カルデラの北西縁に沿う地域では、鉍体は pipe 状ないしは chimney 状を呈する (BURBANK and LUEDKE, 1961)。Fig. 1に、鉍体の集中する地域を点線で囲んで示した。鉍石の平均的鉍物組成は、黄鉄鉍、閃亜鉛鉍、方鉛鉍、黄銅鉍で、脈石鉍物として、石英、方解石、菱マンガン鉍、バラ輝石を伴う (RIDGE, 1972, p. 317-323)。

鉍床形成に先だって母岩のプロピライト化作用が起こり、カルデラを超えて10数 km²の火山岩が変質を受けている (BURBANK, 1960)。プロピライト化した岩石には少量の黄鉄鉍が存在する。

3. 測定試料

測定試料の採集地点を Fig. 1 に示す。試料# 8, #10, #12は、それぞれ、TAYLOR (1974b) の試料 SJ-14, SJ-

33, Col-16-8 と同一の露頭から採集された。

試料 # 8 は、中部中新世の Potosi 火山岩類に属する Treasure Mountain 流紋岩で、San Juan 山地で最も広く分布する岩石の一つである (LARSEN and CROSS, 1956)。分析に用いた試料は変質した灰白色の岩石で、黄鉄鉍を含む。

試料 #10は、下部中新世の Silverton 火山岩類に属する Burns 石英粗面安山岩で、Silverton Caldera 内部およびその南西に分布する (LARSEN and CROSS, 1956)。分析に用いた試料は緑泥石化が進んで緑灰色を呈する、やや斑状の岩石である。

試料 #12は、Silverton Caldera の南東縁に沿って分布する岩株状小貫入岩体の一つをつくる花崗閃緑斑岩で、緑泥石化が進んでいる。

試料 #13は、上記花崗閃緑斑岩中の幅数 mmの石英脈で、Cunningham Creek の合流点の露頭で採集された。

試料 #15は、Ouray 南西およそ 13 km の Idarado Mine (Black Bear Vein) の晶洞から採集された、長さ数 mm から 30 mm の柱状の石英の自形結晶の一つである。Black Bear Vein は、Silverton Caldera の北西側に放射状に発達する割れ目群をみたま脈の一つで、幅は10数 cm から 5 m まで変化し、南西におよそ 60°傾いている (VARNES, 1947)。VARNES (1947)によれば、Black Bear Vein の鉍化作用の主要な段階、すなわち、閃亜鉛鉍、黄銅鉍、方鉛鉍の形成ののちに、母岩中の空隙の壁にそって大きな柱状の石英結晶が形成されている。本報告で分析した石英は、この時期に形成されたものに相当する

Table 1 Oxygen isotope data of whole-rock samples and minerals from the Western San Juan Mountains, Colorado.

Sample Number	Sample Description and Location		$\delta^{18}\text{O}$ SMOW (‰)	
	Y.M.*	H.P.T.**	Y.M.*	H.P.T.**
# 8	SJ-14	Altered Treasure Mtn. rhyolite, on U.S. 550, 1.1 mi S of Red Mtn. Pass.	WR	+1.5 +2.3
#10	SJ-33	Altered quartz latite, Burns Formation, Animas R., 2.5mi NE of Silverton.	WR	-3.1 -4.3
#12	Col-16-8	Chloritized granodiorite porphyry, Animas R., mouth of Cunningham Creek.	WR F C	-5.6 -5.6 -5.2 -7.6
---	Col-14-8	Porphyritic quartz monzonite, NE of Silverton.	WR Q KF F C	+0.8 +6.3 -0.2 -1.9 -4.1
#13	---	Vein quartz in Sample #12	Q	-4.1
#15	---	Euhedral quartz crystal, Idarado Mine (Black Bear Vein).	Q	-5.1

* Y.M. : Present study.

**H.P.T. : TAYLOR (1974b)

Abbreviations: WR, whole-rock; Q, quartz; KF, potassium feldspar; F, plagioclase; C, chlorite.

と思われる。

4. 結果と考察

酸素同位体組成の分析結果を Table 1 に示す。なお、比較のために、TAYLOR (1974b) による分析結果を同じ表に載せた。酸素同位体組成は、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比の標準平均海水 (SMOW) に対する千分率偏差 ($\delta^{18}\text{O}$, ‰) で表わされている。

4.1 全岩の酸素同位体組成

TAYLOR (1974b) と同じ露頭で採集された3つの試料の全岩値は、TAYLOR (1974b) の値に比べて、それぞれ、 -0.8% (#8), $+1.2\%$ (#10), 0% (#12) へだたっている。変質した岩石の同位体組成の露頭内での変動や、異なる実験室間での測定誤差を考慮に入れるならば、両者の一致は大変よいといえる。いずれにせよ、 $+1.5\%$ から -5.6% の全岩値は、新鮮な火成岩の全岩値 ($+5\%$ から $+10\%$) に比べて著しく低く、 ^{18}O に乏しい地下水との同位体交換反応を示唆している。

この地域の現在の天水の酸素同位体組成は、水素同位体組成のデータ (FRIEDMAN *et al.*, 1964) と CRAIG (1961) の式から、 -15% から -18% とみつめられる。TAYLOR (1974a) のいうように、もし、第三紀においてもこの値がそれほど変わっていなかったとすれば、火成岩と天水の反応前の酸素同位体組成の差は、火成岩の同位体組成を、熱水変質の影響を受けにくい石英の値 (Col-14-8) と火成岩の一般的な値とから $+6\%$ と仮定して、21 から 24‰ に達する。この見かけ上の同位体分別は、およそ常温から 100°C における平衡分別に相当し (MATSUHISA *et al.*, 1976)、これより高温で同位体交換反応が起これば、岩石の ^{18}O 濃度は低下する。最終的に岩石がどのような同位体組成を持つかは、反応前の岩石と水の同位体組成のほか、反応温度と、岩石と水の量比、および反応の進行程度に依存している。試料 #8, #10 が、TAYLOR (1974b) と本報文の測定間で $\pm 1\%$ のばらつきを示すのは、同一露頭内でも同位体交換反応の進行程度に多少の差があるためと考えられる。

4.2 鉱物の酸素同位体組成

TAYLOR (1974b) がすでに指摘しているように、石英モンゾニ岩 (Col-14-8) では、石英の酸素同位体組成は $+6.3\%$ で、火成岩の値にほぼ近いのに対して、共存する長石は石英に比べて 6.5% から 8.2% ^{18}O に乏しく、これらの鉱物は酸素同位体平衡にない (火成岩における“正常”な同位体分別では、石英は長石に比べて $1.0\text{--}1.5\%$ ^{18}O に富んでいる)。長石における ^{18}O 濃度の選択的な低下は、鉱物による同位体交換反応のしやすさの違

いによるもので、天水との同位体交換反応がこれらの鉱物の晶出後に起こったことを示している。

母岩の変質によって形成された緑泥石の酸素同位体組成は長石同様に ^{18}O に乏しく、 -4.1% から -7.6% である。花崗閃緑斑岩中の石英脈 (#13) の酸素同位体組成は -4.1% で、火成岩の石英の値に比べて著しく ^{18}O に乏しい。マグマの直接の残しよから晶出した石英脈が、後に天水と反応して二次的に -4% まで低下することは考えにくい。この石英脈は、天水起源の熱水か、少なくとも天水起源の水に富んだ熱水から直接晶出したと考えられる。また、この石英脈を沈殿させた ^{18}O に乏しい熱水が、母岩の変質と二次的同位体交換反応をひきおこしたのであろう。

4.3 鉱床の酸素同位体組成

Idarado Mine (Black Bear Vein) の晶洞中より得た自形石英結晶 (#15) の酸素同位体組成は、花崗閃緑斑岩中の石英脈同様 ^{18}O に乏しく、 -5.1% である。この石英結晶中の流体包有物の均質化温度は 255°C から 300°C で、 255°C 付近を示すものは二次包有物と推定される (武内、私信)¹⁾。熱水の温度を 300°C とすると、この温度で -5.1% の石英と平衡にあった熱水の酸素同位体組成は -12% と計算される (MATSUHISA *et al.*, 1976)。この値は、TAYLOR (1974b) がこの地域の花崗閃緑岩中に含まれる含水鉱物の水素同位体組成から推定した熱水の酸素同位体組成、 -16% にくらべてやや ^{18}O に富んでいる。鉱化作用の末期に石英を沈殿させた熱水は、それに先だつ母岩との同位体交換反応の結果、はじめの天水起源の水に比べていくぶん ^{18}O に富むことになったと考えられる。

ところで、TAYLOR (1974b) は、Silverton Caldera 内部の Gold King Mine の石英脈から $+2.2\%$ の酸素同位体組成を得ている。カルデラの外の放射状脈の石英がカルデラ内部の鉱床の石英に比べて ^{18}O に乏しいことは、放射状脈をつくった熱水系がより天水起源の水に富んでいたか、あるいはより大きな水/岩石比を持っていたことを示唆している。

謝辞 本報告の酸素同位体組成の測定は、筆者が Chicago 大学滞在中に行われた。この測定のために実験室の使用を許可して下さった同大学 R. N. CLAYTON 教授に感謝する。California 工科大学の H. P. TAYLOR, JR. 教授には、試料の採集地点についてご教示いただいた。東京大学の武内寿久教授には、流体包有物の均質化温度を測定していただいた。両教授のご好意に感謝する。地

1) 冷却法によって測定された流体包有物の塩濃度は $0.9\text{--}1.2\text{wt.}\%$ である (武内、私信)。

質調査所の佐々木昭博士には、原稿を読んでいただき、ご批判と助言をいただいたことを感謝する。

文 献

- BURBANK, W. S. (1950) Problems of wall-rock alteration in shallow volcanic environments. *Colo. Sch. Mines Quart.*, vol. 45, p. 288-319, Plate 1.
- (1960) Pre-ore propylization, Silverton Caldera, Colorado. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 400-B, p. B12-B13.
- and LUEDKE, R. G. (1961) Origin and evolution of ore and gangue-forming solutions, Silverton Caldera, San Juan Mountains, Colorado. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 424-C, p. C7-C11.
- CRAIG, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, vol. 133, p. 1702-1703.
- FORESTER, R. W. and TAYLOR, H. P., JR. (1972) Oxygen and hydrogen isotope data on the interaction of meteoric ground waters with a gabbro-diorite stock, San Juan Mountains, Colorado. *24th Int. Geol. Congr.*, sec. 10, p. 254-263.
- FRIEDMAN, I., REDFIELD, A. C., SCHOEN, B. and HARRIS, J. (1964) The variation of the deuterium content of the natural waters in the hydrologic cycle. *Rev. Geophys.*, vol. 2, p. 177-224.
- GARLICK, G. D. and EPSTEIN, S. (1966) The isotopic composition of oxygen and carbon in hydrothermal minerals at Butte, Montana. *Econ. Geol.*, vol. 61, p. 1325-1335.
- 今岡照喜・松久幸敬・村上允英 (1977) 島根県雲城花崗岩類の化学組成と酸素同位体について. 日本地質学会84年大会講演要旨. p. 77.
- 石原舜三・松久幸敬(1975) 中国底盤の形成過程における地表水混入の問題について. *地質雑*, vol. 81, p. 365-371.
- ・———— (1977) 磁鉄鉱系/チタン鉄鉱系花崗岩類と酸素同位体組成との対応性. 日本地質学会84年大会講演要旨, p. 82.
- LARSEN, E. S., JR. and CROSS, W. (1956) Geology and petrology of the San Juan Region, southwestern Colorado. *U. S. Geol. Survey Prof. Paper*, 258, p. 1-303.
- LUEDKE, R. G. and BURBANK, W. S. (1968) Volcanism and cauldron development in the western San Juan Mountains, Colorado. *Colo. Sch. Mines Quart.*, vol. 63, p. 175-208.
- MATSUHIRA, Y., GOLDSMITH, J. R. and CLAYTON, R. N. (1976) Oxygen isotopic fractionation in the system quartz-albite-anorthite-water. *Geol. Soc. America Abstracts*, vol. 8, p. 999.
- O'NEIL, J. R., SILBERMAN, M. L., FABBII, B. P. and CHESTERMAN, C. W. (1973) Stable isotope and chemical relations during mineralization in the Bodie mining district, Mono County, California. *Econ. Geol.*, vol. 68, p. 765-784.
- RIDGE, J. D. (1972) Annotated bibliographies of mineral deposits in the western hemisphere. *Geol. Soc. America Memoir*, 131, p. 317-323.
- SHEPPARD, S. M. F., NIELSEN, R. L. and TAYLOR, H. P., JR. (1971) Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, vol. 66, p. 515-542.
- TAYLOR, H. P., JR. (1971) Oxygen isotope evidence for large-scale interaction between meteoric ground waters and Tertiary granodiorite intrusions, western Cascade Range, Oregon. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 76, p. 7855-7874.
- (1973) O^{18}/O^{16} evidence for meteoric-hydrothermal alteration and ore deposition in the Tonopah, Comstock Lode, and Goldfield mining districts, Nevada. *Econ. Geol.*, vol. 68, p. 747-764.
- (1974a) The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Econ. Geol.*, vol. 69, p. 843-883.
- (1974b) Oxygen and hydrogen isotope evidence for large-scale circulation and interaction between ground waters and igneous intrusions, with particular reference to the San Juan volcanic field,

Colorado. in *Geochemical Transport and Kinetics* (ed. HOFMANN, A. W., GILETTI, B. J., YODER, H. S., JR. and YUND, R. A.), Carnegie Inst. Washington, Publication 634, p. 299-324.

——— and FORESTER, R. W. (1971) Low-O¹⁸ igneous rocks from the intrusive complexes of Skye, Mull, and Ardnamurchan, western

Scotland. *Jour. Petrol.*, vol. 12, p. 465-497.

VARNES, D. J. (1947) Recent development of the Black Bear Vein, San Miguel County, Colorado. *Colo. Sci. Soc. Proc.*, vol. 15, p. 135-146.

(受付: 1978年1月13日; 受理: 1978年2月19日)