

カルサイトの炭素・酸素同位体比から見た 野島断層浅部破碎帯のシール過程の解明

新井 崇史* 塚原 弘昭** 森 清寿朗***

Sealing Process with Calcite in the Nojima Active Fault Zone Revealed from Isotope Analysis of Calcite

Takashi ARAI *, Hiroaki TSUKAHARA** and Toshiro MORIKIYO***

Abstract

The Nojima fault appeared on the surface in the northern part of Awaji Island, central Japan as a result of the Hyogo-ken Nanbu earthquake (1995, $M = 7.2$). Active fault drilling was performed by the Disaster Prevention Research Institute (DPRI) Kyoto University, and core samples were retrieved from 1410 to 1710 m, which were composed of intact and fractured granodiorites. We obtained calcite samples and gas samples from the vein in marginal fracture and non-fracture zones. We analyzed the carbon and oxygen isotope ratios of calcite and carbon dioxide to investigate the characteristic isotope ratios of fluids in the active fault zone, to estimate the origins of fluids, and to determine the sealing process of fractures. The analyzed values of carbon and oxygen isotope ratios of calcite were -10.3 to -7.2‰ , 18 to 23‰ , respectively, and carbon isotope ratios of CO_2 were -21 to -17‰ . If carbon isotope ratios of calcite were at equilibrium with those of CO_2 , the precipitation temperature of calcite is calculated to be 30 to 50 °C. This temperature is consistent with the present temperature of the depth where drilling cores were retrieved. Oxygen isotope ratios of H_2O that precipitated calcite were calculated to be -1.8 to -5.5‰ . These values indicate calcite were precipitated from mixed fluids of sea water and meteoric water. Therefore, the marginal fracture zone of the Nojima fault was sealed with calcite, which was generated from mixing of sea water and meteoric water *in situ*.

Key words: earthquake, isotopic geochemistry, fault fluids, sealing process, Nojima Fault, isotope geothermometer

キーワード: 地震, 同位体地球化学, 断層流体, シール過程, 野島断層, 同位体地質温度計

* 信州大学理学部物質循環学科 (現, 産業技術総合研究所)

** 信州大学理学部物質循環学科

*** 信州大学理学部地質学科

* Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University (Present address: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)

** Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University

*** Department of Geology, Faculty of Science, Shinshu University

I. はじめに

断層帯における岩石-流体相互作用において主要な役割を果たす流体化学成分の1つに炭酸ガス(CO_2)がある。 CO_2 は、地下水中に溶け込むと、水素イオン(H^+)と重炭酸イオン(HCO_3^-)に解離する。水素イオンは岩石を溶解するが、重炭酸イオンはカルシウムイオン(Ca^{2+})と反応し、カルサイト(CaCO_3)を形成する。このように形成されたカルサイトは、断層破砕帯をシールする鉱物として、断層岩中に見うけられることが多い。よって、水に溶存する CO_2 やカルサイト形成が、地震後の断層の性質やシーリングによる断層回復過程に与える影響は大きいと考えられる。

1995年兵庫県南部地震($M = 7.2$)の際に滑った野島断層が露出している兵庫県淡路島北淡町

において、京都大学防災研究所により深度約1700 mのボーリング孔(DPRI 1800 m孔)が掘削された(Ando, 2001)(図1)。この掘削は、地表断層の東側、水平距離にして約450 mの地点から深度約1800 mの断層上盤側破砕帯に向けて実施され、同時に、掘削深度1250 ~ 1710 m間のコアが連続的に回収された(図2)。

その際、新井ほか(1998), Arai *et al.* (2001)は、掘削直後の野島断層ボーリングコア(1410 ~ 1710 m間)から地中ガスを採取し、これを分析した結果、断層帯内から採取されたガスの主成分の1つが CO_2 であることを報告した。一方、破砕帯の多くにカルサイト(CaCO_3)が脈状に多数存在し、破砕帯をセメンチングしている観察例も、多数報告されている(例えば, Fujimoto *et al.*, 2001)。

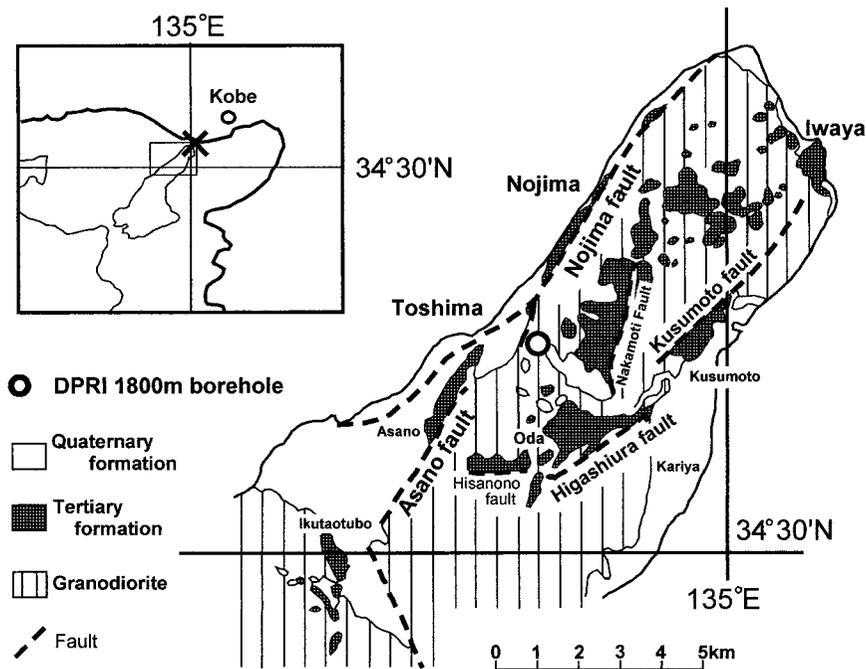


図1 淡路島北部のDPRI 1800 m孔の掘削地点(白丸印)および周辺地質図(水野ほか, 1990に掘削地点を加筆)。地表活断層は点線で示されている。

Fig. 1 Location of DPRI 1800 m drill site (open circle) with simplified geologic map (from Mizuno *et al.*, 1990) of northern part of Awaji Island. Surface trace of active faults is shown by dotted lines.

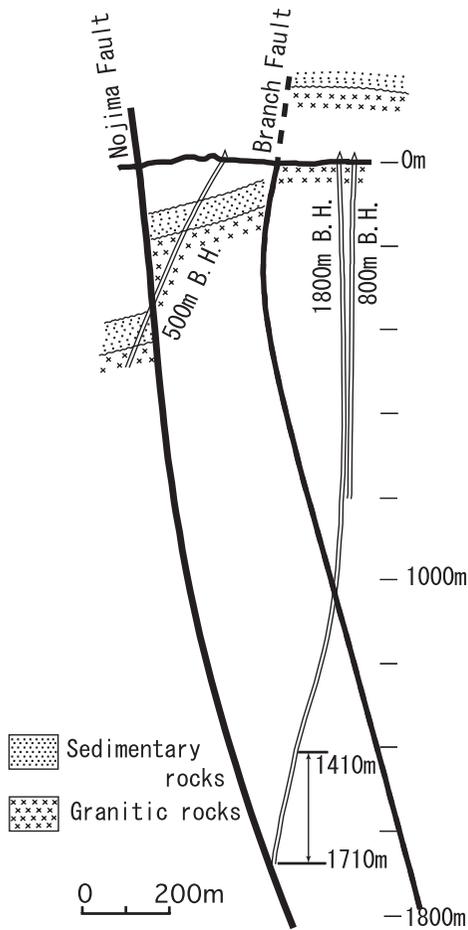


図 2 京都大学防災研究所によって実施された 1800, 800, 500 m の各掘削孔と断層の関係を示す断面図。

ガスおよびカルサイトは、1800 m 孔の掘削深度 1410 ~ 1710 m において採取された。

Fig. 2 Vertical cross-section and the positions of three boreholes of the Disaster Prevention of Research Institute and Nojima fault.

Gas and calcite samples were extracted from core specimens obtained at drilling depths between 1410 m and 1710 m in 1800 m boreholes.

本論では、野島断層破碎帯を一例として、地中ガス中の CO_2 の炭素同位体比 ($^{13}\text{Q} \text{CO}_2$) と脈状に産するカルサイトの炭素・酸素同位体比 ($^{13}\text{Q} \text{CaCO}_3$, $^{18}\text{Q} \text{CaCO}_3$) を測定し、その特徴を明らかにした。これらの同位体比は、断層

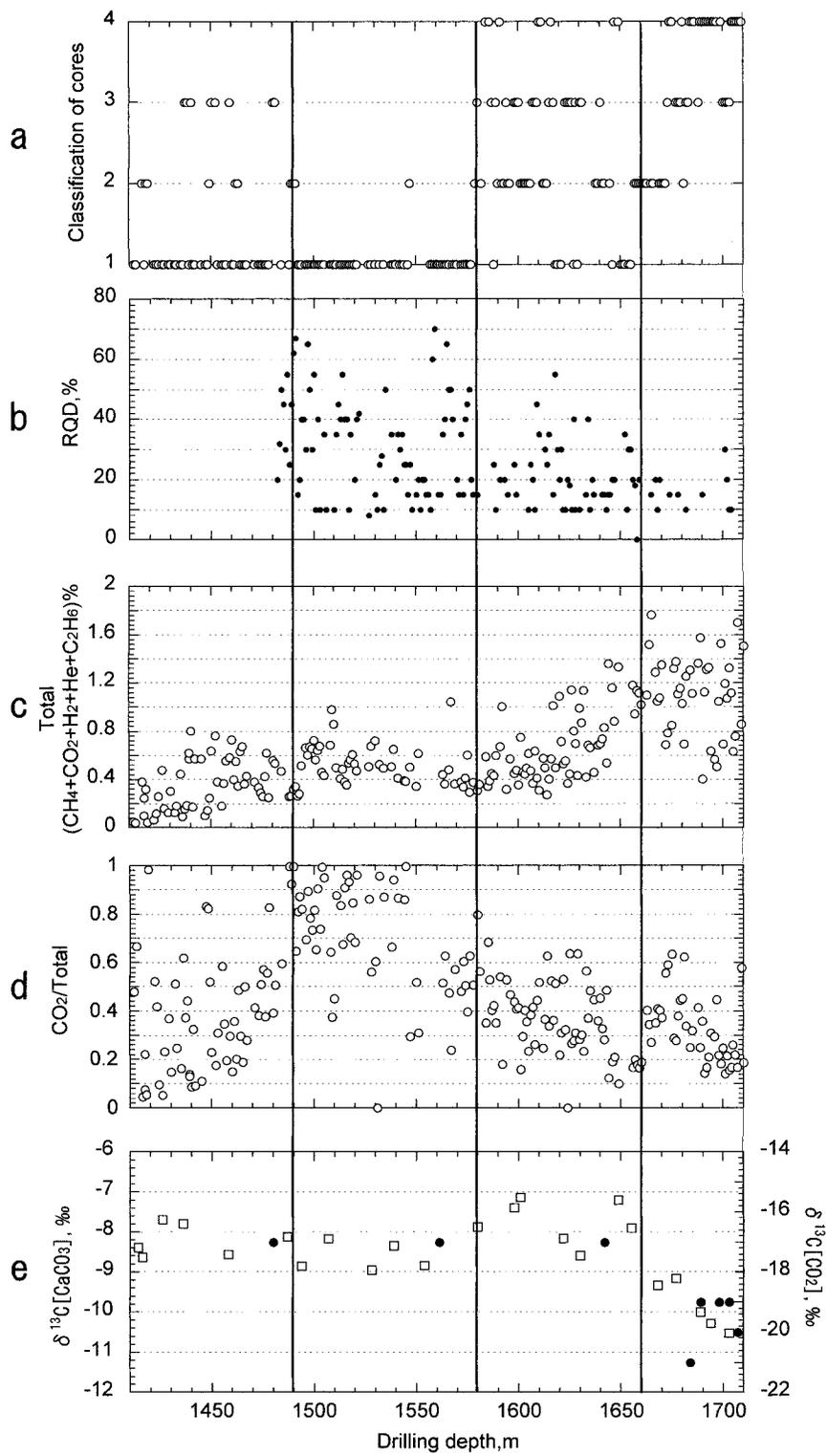
内流体の起源の情報を保持しているだけでなく、仮に同位体平衡に達していれば、これらと比較することで断層帯のシール温度の推定にも有用となる。

Tadokoro *et al.* (2000) は、S 波偏向異方性の時間変化から断層深部が地震発生から 3 年以内に固着していた可能性を指摘している。これらの地震波観測結果から得られる固着とは、必ずしも強度の回復ではなくともよい。亀裂が物質で充填されれば地震波にとっては固着が完了したことになる。よって、断層帯のシール機構を明らかにする上でこのような議論は欠かせない。また、小林ほか (1999) は、DPRI 1800 m 孔の全長にわたるコア観察を行った結果、主スリップゾーンに相当する断層ガウジ帯が認められなかったため、ボーリング孔は主スリップゾーンに到達しておらず、コアとして採取された部分は破碎帯外縁部に当たると見なした。しかし、小林ほか (1999) も指摘しているように、このような上盤側破碎帯外縁部の構造は、断層帯の透水特性を考察する上でも重要であり、流体の挙動に大きな影響を与えていると考えられる。

II. 測定方法

ガス抽出は、回収されたばかりのコアから真空ポンプを利用することにより採取した。詳細は新井ほか (1998) を参考にさせていただきたい。ガス濃度分析は、ガスクロマトグラフ (大倉社製ガスクロマトグラフ Model-802T) で測定した。ガスクロマトグラフの CO_2 濃度の分析誤差は、 $\pm 0.5 \text{ ppm}$ 以内である。 CO_2 の炭素同位体比 (^{13}C) は東京大学理学部地殻化学実験施設の irmGC/C/MS (ガスクロマトグラフと燃焼炉と同位体質量分析計をオンラインで接続した装置) (角皆, 1997) を用いて分析した (測定誤差は $\pm 1 \text{ ‰}$)。

一方、カルサイトは脈状に産するものを鉄釘で直接削りだした。これを、めのう乳鉢を使って粉末状にした後、粉末 X 線回折装置 (XRD) により鑑定をおこない、カルサイトを多く含有するサンプルを選定し、分析用試料として使用した。試料約 0.5 mg を次式のように 100% のリン酸と反応さ



せ，発生した CO_2 を抽出し，これを CaCO_3 の炭素・酸素同位体組成の測定に用いた (McCrea, 1950)。

$2\text{H}_3\text{PO}_4 + 3\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
リン酸との反応で抽出される CO_2 とカルサイトでは，温度に依存して酸素同位体比が異なる。このため，25℃で反応させ， CO_2 と CaCO_3 間の同位体分別係数の値として，Sharma and Clayton (1965) の値，1.01025 を用いた。

ただし，亀裂群を充填する炭酸塩鉱物には主要鉱物カルサイト (CaCO_3) の他に，シデライト (FeCO_3)，ドロマイト [$\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{CO}_3$] も少量存在する。反応に要する時間は鉱物種により異なり，25℃でカルサイトは1時間，ドロマイトは3日間，シデライトについては，50℃で1週間要する (Epstein *et al.*, 1964)。そこで，25℃で反応開始後，1時間までに抽出された CO_2 の炭素・酸素同位体比を測定し，ドロマイト，シデライトの影響を受けないようにした。同位体比の測定は信州大学理学部地質学教室の MAT250 質量分析計を用いた。測定値は，標準物質からの千分偏差値 (‰) で表示する。炭素同位体比に関しては，PDB (Peedee 層産 Belemnite) を基準とし，酸素同位体比に関しては，標準平均海水 (SMOW) を基準とした。測定誤差は， ^{13}C [CaCO_3] が $\pm 0.1\text{‰}$ 以内， ^{18}O [CaCO_3] が $\pm 0.3\text{‰}$ 以内であった。

III. 測定結果

1) コア試料の破碎度の深度による変化とカルサイト脈傾斜角との関係について

同位体比およびガス濃度の深度分布と比較するため，ガスを採取した岩石コア試料 (10 ~ 20 cm) を肉眼で観察して，岩石試料の外見を次のように簡易的に区分した (図 3a)。

1 : 肉眼で観察できるほどの微小亀裂 (幅 0.5 mm 以下) が見うけられるものの，破碎をほとんど受けていない比較的新鮮なコア。

2 : 若干破碎作用を受けることにより，白濁して見えるが，岩石の組織は明瞭であるコア。

3 : コア全体が白色を呈し，岩石の組織がやや不明瞭である。2 との違いは，岩石の一部または全体が破碎作用を受け，礫状もしくは砂状を呈す。

4 : 一部または多くが灰色を呈し，粘土状になっているコア。

これらと比較するために，掘削深度 1470 m 以深における RQD (Rock Quality Designation) 値を計測した。RQD 値は，1 m 中に含まれる 10 cm 以上の棒状コア総計長の割合を示した値で，岩盤の不連続性 (割れ目の多さ) を示す指数として用いられる (図 3b)。

両グラフから 1490 ~ 1580 m で破碎の程度が最も低いこと，1660 m 以深で最も破碎が進行していることがわかる。

一方，120 個のカルサイト脈の傾斜角を測定し

図 3 ガス濃度および炭素同位体比の深度分布。

- a : コアの破碎の程度 : 1 ~ 4 (詳細は本文参照)。
b : 1 m 中に含まれる 10 cm 以上の棒状コア総計長の割合を示した値 (RQD 値)。
c : CH_4 , CO_2 , H_2 , C_2H_6 , He ガス濃度の総和。
d : c のガス濃度の総和に対する CO_2 濃度の割合。
e : CO_2 ガスとカルサイト脈の炭素同位体比。印は CO_2 の炭素同位体比，印はカルサイトの炭素同位体比を表す。また，コアの破碎の程度および RQD 値から 1410 ~ 1710 m 間を直線で 4 区間に区分した (1490 m, 1580 m, 1660 m)。

Fig. 3 Variations in gas concentration and carbon isotope ratio with depth.

- a : Degree of fragmentation of core specimens. Weak to strong : 1 to 4 (see text).
b : Percentage in length of core specimens longer than 10 cm in 1 m.
c : Total gas concentration of ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{He}$) in ppm.
d : Concentration of CO_2 relative to the total gas concentration.
e : Carbon isotope ratios of CO_2 extracted from core specimens and of CaCO_3 from carbonate veins. Closed circle and open square indicate carbon isotope ratios of CO_2 and CaCO_3 , respectively.
We divided them into four sections from the results of values for fragmentation and RQD (solid lines).

表 1 同位体比測定用に採取した各深度に占めるカルサイト脈の本数およびその傾斜角の割合。

Table 1 Numbers and rate for dip of calcite veins with depth.

	0-30°	Number of veins	30-60°	Number of veins	60-91°	Number of veins
1410-1490 m	42.1%	8	15.8%	3	42.1%	8
1490-1580 m	42.3%	11	26.9%	7	30.8%	8
1580-1660 m	9.5%	2	19.0%	4	71.4%	15
1660-1710 m	5.9%	1	35.3%	6	58.8%	10

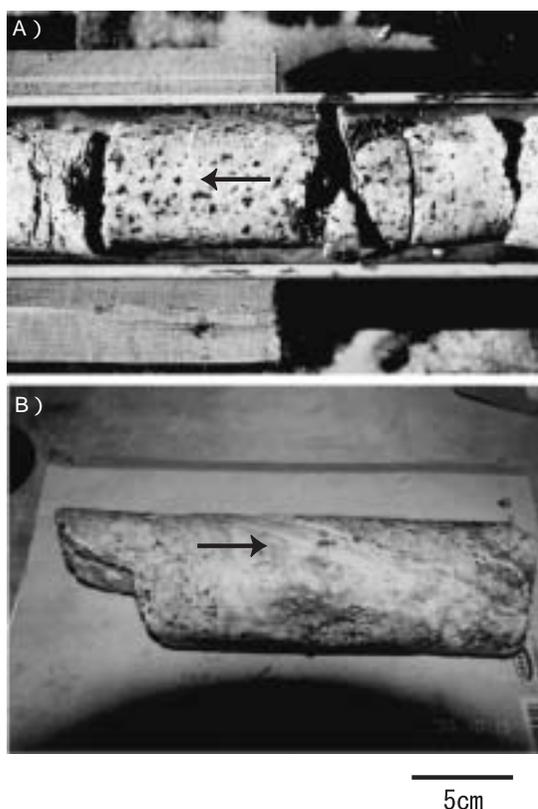


図 4 1538 m と 1640 m における脈の写真の一例。
A) 比較的破碎を受けていない個所では、低角で純粋なカルサイト脈が卓越する。

B) 破碎を受けている個所ではカルサイト脈は高角であり、花崗閃緑岩の岩片を含むことが多い。

Fig. 4 Photos of veins at depths of 1538 m and 1640 m.

A) In the non-fractured zone, calcite veins at a low angle dominated.

B) In the fracture zone, calcite veins at a high angle dominated. They often contain fragments of granodiorite.

た結果、1460 ~ 1560 m の岩石が破碎の影響をほぼ受けていない深度では、低角 (0 ~ 30°) のカルサイト脈が卓越しており、その他の深度では高角 (60 ~ 90°) のカルサイト脈が卓越していることがわかった (表 1, 図 4)。ただし、1410 ~ 1710 m 間の孔井傾斜角は 80° NW なので、亀裂の傾斜角には最大 ± 10° の誤差があると考えられる。Murata *et al.* (2001) によると、野島断層の傾斜角は、83° SE と高角である。破碎の進行した深度で高角のカルサイト脈が多いことは、断層運動と鉱物脈形成に明確な相関があることを示している。

2) 二酸化炭素濃度とその炭素同位体比の深度による変化とその起源について

新井ほか (1998), Arai *et al.* (2001) によれば、コア試料において、岩石が比較的破碎を受けていない場所では、岩石に含有されるガスの主成分は CO₂ である (図 3d)。図 3d は、大気主成分以外のガス濃度の総和 (CH₄ + CO₂ + H₂ + C₂H₆ + He) (図 3c に示す) 中に CO₂ が占める割合を深度に対してプロットし、その変化を示している。図 3a と図 3d とを比較すると、破碎度の低い場所で CO₂ 濃度が高いことがわかる。

一方、CO₂ の起源を特定するために CO₂ の炭素同位体比 (¹³Q CO₂]) を測定したところ -17 ~ -21‰ となった (図 3e の丸印)。これらの値は、高温火山ガス、中低温噴気ガス・温泉ガスなどの地熱地域に湧出する ¹³Q CO₂] (-10 ~ 0‰ : 例えば, Sano and Marty, 1995) とは大きく異なる。よって、マグマ揮発性成分の寄与したガスである可能性は低く、表層で取り込まれた CO₂ である可能性が高い。例えば、堆積物中の有機炭素の関与が高い ¹³Q CO₂] は、このような値をとる (Sano

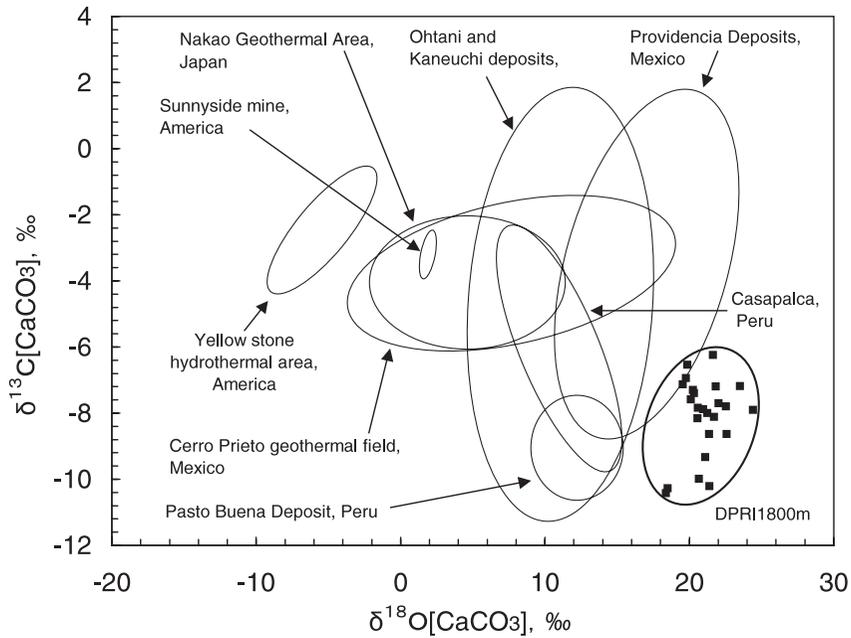


図 5 世界の鉱床および地熱地帯に見られるカルサイト脈と DPRI 1800 m ボーリングコア中のカルサイト脈の炭素・酸素同位体比との比較。
 DPRI 1800 m 以外の値は, Rye (1966), Landis and Rye (1974), Rye and Sawkins (1974), Casadevall and Ohmoto (1977), Olson (1979), 水谷ほか (1983), Morishita (1990), Sturchio *et al.* (1990) の値を引用。

Fig. 5 The relationship between ^{13}C and ^{18}O of CaCO_3 in calcite veins in deposits, mine, and geothermal areas in the world with those of DPRI 1800 m drilling cores (open circle).

Data are from Rye (1966), Landis and Rye (1974), Rye and Sawkins (1974), Casadevall and Ohmoto (1977), Olson (1979), Mizutani *et al.* (1983), Morishita (1990), and Sturchio *et al.* (1990).

and Marty, 1995; 佐野, 1996)。淡路島北部に分布する花崗岩は, 第三紀, および第四紀の堆積岩によって覆われており, これらの堆積物および現世の海底堆積物を起源としている可能性が高い。

さらに, $^{13}\text{Q}[\text{CO}_2]$ の深度分布を詳しく見ると, 図 3e (丸印) に示すように 1660 m 以浅では -17‰, 1660 m 以深では -19 ~ -21‰を示し, 破碎の程度が大きく変化する掘削深度約 1660 m を境に炭素同位体組成が, 2 ~ 3‰下がることになる。

3) カルサイトの炭素・酸素同位体比の深度による変化とその値の特徴について

DPRI ボーリングコア中の $^{13}\text{Q}[\text{CaCO}_3]$,

$^{18}\text{Q}[\text{CaCO}_3]$ は, それぞれ -11 ~ -7‰, 18 ~ 23‰であった。これらの測定値を熱水鉱床および地熱地帯で測定されたカルサイト脈中の $^{13}\text{C}[\text{CaCO}_3]$, $^{18}\text{Q}[\text{CaCO}_3]$ と比較してみた。図 5 に四角印 (黒色) で示すように地熱地帯等の他地域のデータとは外れた領域にあることがわかる。

$^{13}\text{Q}[\text{CaCO}_3]$ 値は, 他地域と比べて低い値, $^{18}\text{Q}[\text{CaCO}_3]$ 値は, 他地域と比べて高い値を示している。

カルサイトの産状が脈状であることから, 亀裂中を通過する地下水に含まれる炭酸イオンがカルシウムイオン (Ca^{2+}) と反応し, この亀裂中で沈殿したものと考えられる。よって, ^{13}C

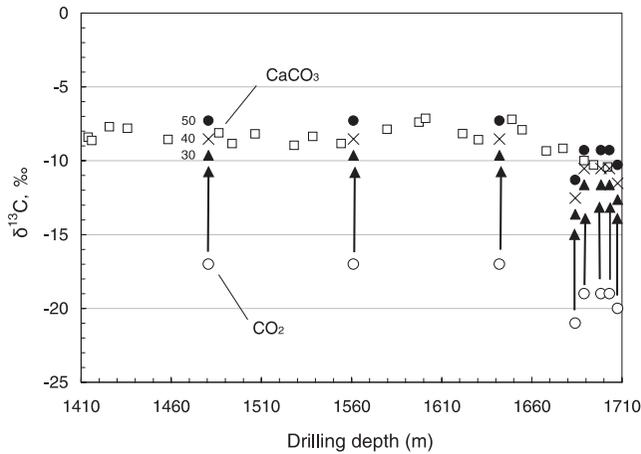


図 6 コア試料中の CO₂ ガスの炭素同位体比 (○印) とカルサイトの炭素同位体比 (□印) の深度分布 tenn .
 印, × 印, ● 印 は, CO₂ の炭素同位体比 (○印) から算出された 30, 40, 50 ° で同位体平衡にあるカルサイトの炭素同位体比を示している .

Fig. 6 Carbon isotope ratio of CO₂ (open circle) and those of CaCO₃ (open square) with depth from core specimens.

Closed triangle, cross, and closed circle indicate calculated values of carbon isotope ratio of CaCO₃ in equilibrium with CO₂ at the temperature of 30, 40 and 50 °, respectively.

[CaCO₃] 値が比較的低い値を示すのは, DPRI ボーリングコア中のカルサイトが, 他の地熱地帯と異なり比較的軽い炭素同位体比をもつ炭酸水 (CO₂ を溶存する) から沈殿し, ¹⁸Q[CaCO₃] 値が高い値を示すのは, 比較的重い炭素同位体比をもつ水から沈殿したことによると推定される。

一方, ¹³Q[CaCO₃] 値の深度分布 (図 3e) と破碎度の深度分布 (図 3a) との間には明確な相関は見られないが, 最も破碎の進んだ掘削深度 1660 m 以深では 1 ~ 2 ‰ 同位体比が下がっているのが明瞭に見られる。先述したように, 同様の傾向が ¹³Q[CO₂] の深度分布にも見られた。CO₂ とカルサイトの関係についての詳細は後述する。

IV. 考 察

1) カルサイトと CO₂ の炭素同位体比から推定した破碎帯シール温度の推定

¹³Q[CO₂] と ¹³Q[CaCO₃] の深度分布は,

図 3e に示すように 1660 m 以深でどちらもその値が低くなるなど, 関連が深いように見える。そこで, 溶存 CO₂ ガスとカルサイトの関係について考えてみる。

CO₂ は, H₂O を介してカルサイトと炭素同位体交換をする。CaCO₃ CO₂ 間の炭素同位体分別の温度依存性は次のように確立している (Bottinga, 1968)。

$$\begin{aligned}
 1000 \ln \frac{c[\text{CaCO}_3]}{c[\text{CO}_2]} &= \frac{13Q[\text{CaCO}_3]}{T} \\
 &- \frac{13Q[\text{CO}_2]}{T} \\
 &= -2.4612 + (7.6663 \times 10^3/T) \\
 &- (2.9880 \times 10^6/T^2) \quad (1)
 \end{aligned}$$

ボーリングコアから採取された溶存 CO₂ ガスの ¹³Q[CO₂] と, 30, 40, 50 ° において炭素同位体平衡にある ¹³Q[CaCO₃] の値を上式により算出した。その値を図 6 にプロットしてみる。

すると、実測した $^{13}\text{C}[\text{CaCO}_3]$ と $^{13}\text{C}[\text{CO}_2]$ から算出された 40 m における $^{13}\text{C}[\text{CaCO}_3]$ の値とは、1660 m を境にした同位体比の変化も含めてほぼ一致することがわかった。 $^{13}\text{C}[\text{CO}_2]$ の測定誤差が $\pm 1\%$ であることを考えると、 CaCO_3 は 30 ~ 50 °C の温度範囲内で形成されたと推定できる。ガスおよびカルサイト採取深度 (1410 ~ 1710 m) の地温は、孔内検層データによると 44 ~ 49 °C であるから、 $^{13}\text{C}[\text{CaCO}_3]$ と $^{13}\text{C}[\text{CO}_2]$ が炭素同位体平衡にあったと仮定すると、カルサイトは地温に近い温度で、つまり現在の場所で形成され亀裂をシールしたと考えられる。

一方、1660 m 以浅と以深で $^{13}\text{C}[\text{CaCO}_3]$ 、 $^{13}\text{C}[\text{CO}_2]$ の値が 2 ~ 3 ‰ 程異なるのは何故だろうか。この破碎帯中を流れていた流体が CaCO_3 を沈殿させつつ、破碎が進行していない周囲の亀裂中に拡散し、同様にカルサイトを沈殿させていったとすると、破碎帯からその周辺部に向かって $^{13}\text{C}[\text{CaCO}_3]$ 値は低くなる。ところが破碎帯である 1660 m 以深で逆に低くなっている。この事実は、破碎帯内から流体が拡散したことによって、同位体比が変化したことを示すものではない。つまり、破碎帯内外で、カルサイト脈を形成した流体の性質が異なっていたことを示している。

2) CO_2 あるいは HCO_3^- を運んだ H_2O の起源

カルサイトの ^{18}O の測定結果と深度との関係を図 7 に示す。バラつきは少なく、直線的に変化しているのが見える。前節で、 CaCO_3 は溶存 CO_2 とガス採取深度の地温に近い低温環境で炭素同位体平衡に達していることが判明したと述べた。よって、カルサイトと H_2O も地温に近い温度で酸素同位体平衡に達していると仮定し、 $^{18}\text{O}[\text{CaCO}_3]$ 値から CO_2 または HCO_3^- を運んできた H_2O の酸素同位体組成を算出し、その起源について考察する。 CaCO_3 - H_2O 間の酸素同位体分別の温度依存性は次式のように確立している (O'Neil *et al.*, 1969)。

$$\begin{aligned} 1000 \ln \left[\frac{^{18}\text{O}[\text{CaCO}_3]}{^{18}\text{O}[\text{H}_2\text{O}]} \right] &= 18 \left[\frac{^{18}\text{O}[\text{CaCO}_3]}{^{16}\text{O}[\text{CaCO}_3]} - \frac{^{18}\text{O}[\text{H}_2\text{O}]}{^{16}\text{O}[\text{H}_2\text{O}]} \right] \\ &= 2.78 \left(10^6 T^{-2} \right) - 2.89 \end{aligned} \quad (2)$$

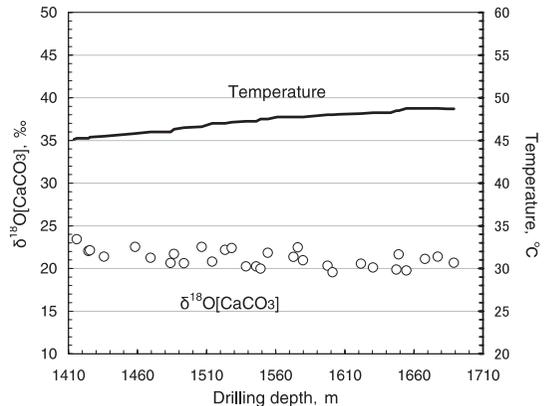


図 7 DPRI 1800 m ボーリングコア中のカルサイト脈の酸素同位体比 (○印) と物理検層から得られた温度データ (黒線) の深度分布。

Fig. 7 Oxygen isotope ratios of calcite (open circle) in DPRI 1800 m drilling cores and temperature (solid line) from geophysical well logging results with depth.

よって、カルサイトが、コア採取深度の地温 (44 ~ 49 °C) で形成され、酸素同位体平衡に達していると仮定し、カルサイトを沈殿させた水の $^{18}\text{O}[\text{H}_2\text{O}]$ を (2) 式から算出した。その結果、 $^{18}\text{O}[\text{H}_2\text{O}]$ 値は、-1.8 ~ -5.5 ‰ の範囲をとることがわかった。

地表水・浅層地下水の酸素同位体比の地理的分布を見ると淡路島のそれは -7 ~ -8 ‰ である (Mizota and Kusakabe, 1994)。

算出された $^{18}\text{O}[\text{H}_2\text{O}]$ 値の測定結果は、地表水・浅層地下水の酸素同位体比に比べ、比較的高い値を示し、重い酸素同位体組成をもつ水からカルサイトが形成されたことを示唆している。重い酸素同位体組成をもつことで知られている水は、深部熱水および海水 (0 ‰) である (松葉谷, 1991)。このどちらかがカルサイトの沈殿に寄与した可能性が考えられる。通常、深部熱水が湧出する地域では、これに付随する $^{13}\text{C}[\text{CO}_2]$ も高い値を示す。しかし、DPRI 1800 m 孔ボーリングコアから採取された溶存炭酸ガスの炭素同位体組成は地熱地帯に湧出する炭素同位体組成と異なることは、(2) 章で述べた。よって、カルサイトを

沈殿させた水が深部熱水であることは考えにくい。つまり、DPRI 1800 m 孔ボーリングコア中のカルサイトを沈殿させた水は、海水を多量に含んだ水である可能性が高い。同じく Ueda *et al.* (1999) は、地質調査所によって掘削されたボーリングコア中の炭酸塩の酸素同位体比を測定した結果、同様の結論を得ている。

ただし、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ [CaCO₃] 値は、深度が深くなるにつれ全体的に減少している。この理由として、地温勾配を反映して同位体組成が変化したことが考えられる。しかし、孔内検層による温度勾配 (45 ~ 50 °C) から理論的に求められる酸素同位体比変動幅 (約 0.7‰) と実測同位体比変動幅 (約 2.5‰) は一致せず、原因は不明である。

V. ま と め

本論では、野島断層破碎帯から得られたコア中の CO₂ およびカルサイト脈の炭素、酸素の同位体比を測定し、以下の点を明らかにした。

1. 岩石の破碎が比較的進行した深度におけるカルサイト充填亀裂の傾斜角は、非破碎部に比べ高角のものが卓越している。野島断層の傾斜角は高角であることから破碎帯における高角の炭酸塩脈形成が、断層運動に関連していると考えられる。

2. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ [CO₂] と $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ [CaCO₃] の深度分布パターンは、ほぼ一致していた。これらが炭素同位体平衡にあると仮定すると、30 ~ 50 °C においてカルサイト脈が形成されたと推定された。さらに、これらの沈殿過程に寄与した流体は、カルサイトの酸素同位体比の測定結果から、海水と天水の混合流体である可能性が高い。つまり、野島断層帯に見られるカルサイト脈は、現在の地温条件で、現在地下に存在する水から沈殿したと言える。

3. 野島断層破碎帯外縁部の断層浅部 (1410 ~ 1710 m) では、CO₂ ガスはカルサイト脈形成に寄与し、破碎帯をシールさせる断層帯回復過程の一端を担っていたと考えられる。

謝 辞

京都大学防災研究所 (現名古屋大学) の安藤雅孝教授には、コア利用の機会を与えていただいた。CO₂ の炭素同位体比分析に当たっては、東京大学地殻化学教室の野津憲治教授、佐藤雅則氏にご指導いただいた。また、ボーリング現場では、住鉱コンサルタント株式会社の川西氏、西岡氏、植木氏をはじめ同社の皆様に大変お世話になった。また、本論を作成するに当たってお二人の査読者には、有意義なコメントをいただいた。ここにお礼を申し上げます。

文 献

- Ando, M. (2001) Geoplogical and geophysical studies of the Nojima Fault from drilling: An outline of the Nojima fault zone probe. *The Island Arc*, **10**, 206-214.
- 新井崇史・奥澤 保・塚原弘昭 (1998) 野島断層小倉 1800 m 孔ボーリングコアから抽出したガスの化学成分および炭素同位体比から推定した断層帯中のガスの挙動. 月刊地球, 号外, **21**, 165-170.
- Arai, T., Okusawa, T. and Tsukahara, T. (2001) Behavior of gases in the Nojima Fault Zone revealed from the chemical composition and isotope ratio of gases extracted from DPRI 1800 m drill core. *The Island Arc*, **10**, 430-438.
- Bottinga, Y. (1968) Calculation of fractionation factors for carbon and oxygen isotopic exchange in the system calcite-carbon dioxide-water. *J. Phys. Chem.*, **72**, 800-808.
- Casadevall, T. and Ohmoto, H. (1977) Sunnyside mine, Eureka mining district, San Juan County, Colorado: Geochemistry of gold and base metal ore formation in the volcanic environment. *Econ. Geol.*, **72**, 1285-1320.
- Epstein, S., Graf, D. and Degens, E.T. (1964) *Oxygen Isotope Studies on the Origin of Dolomites*. Isotope and Cosmic Chemistry, Amsterdam: North Holland Publ. Comp.
- Fujimoto, K., Tanaka, H., Higuchi, T., Tomida, N., Ohtani, T. and Ito, H. (2001) Alteration and mass transfer inferred from the Hirabayashi GSJ drill penetrating the Nojima fault, Japan. *The Island Arc*, **10**, 401-410.
- 小林健太・福地龍郎・長谷部徳子・林 愛明・丸山正・松田達生・村田明広・重富素子・島田耕史・竹村恵二・田中秀実・田中菜摘・富田直人・豊田宗則・宇田進一・山北 聡 (1999) 野島断層 1800 m 孔掘削コアに見られる破碎帯外縁部の産状. 地質学雑誌, **10**,
- Landis, P.G. and Rye, O.R. (1974) Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the Pasto Buena tungsten-base metal ore deposit, northern Peru. *Econ. Geol.*, **69**, 1025-1037.

- 松葉谷 治 (1991) 熱水の地球化学. 裳華房.
- McCrea, J.M. (1950) On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, **18**, 849-857.
- Mizota, C. and Kusakabe, M. (1994) Spatial distribution of D-¹⁸O values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China. *Geochem. J.*, **28**, 387-410.
- 水谷義彦・秋山伸一・木村美紀夫・日下部 実・佐竹洋・臼井和人・前田伊通子 (1983) 岐阜県中尾地域の地熱調査井 54-NK-1 における岩石変質と変質鉱物の同位体地球化学. 日本地熱学会誌, **5**(2), 121-138.
- 水野清秀・服部 仁・寒川 旭・高橋 浩 (1990) 明石地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 21-29.
- Morishita, Y. (1990) Fluid evolution and geobarometry on the Ohtani and Kaneuchi tungsten-quartz vein deposits, Japan: Oxygen and carbon isotopic evidence. *Mineralium Deposita*, **26**, 40-50.
- Murata, A., Takemura, K., Miyata, T. and Lin, A. (2001) Quaternary vertical offset and average slip rate of the Nojima fault on Awaji Island, Japan. *The Island Arc*, **10**, 360-367.
- Olson, E.R. (1979) Oxygen and carbon isotopes studies of calcite from the Cerro Preito geothermal field. *Geothermics*, **8**, 245-251.
- O'Neil, R.J., Clayton, R.N. and Mayeda, T.K. (1969) Oxygen Isotope Fractionation in Divalent Metal Carbonates. *J. Chem. Phys.*, **51**, 5547-5558.
- Rye, O.R. (1966) The carbon, hydrogen, and oxygen isotopic composition of the hydrothermal fluids responsible for the lead-zinc deposits at Providencia, Zacatecas, Mexico. *Econ. Geol.*, **61**, 1399-1427.
- Rye, O.R. and Sawkins, J.F. (1974) Fluid inclusion and stable isotope studies on the Casapalca Ag-Pb-Zn-Cu deposit, Central Andes, Peru. *Econ. Geol.*, **69**, 181-205.
- 佐野有司 (1996) ヘリウム・炭素同位体比からみマグマ起源ガスと地殻物質との相互作用. 地質学論集, **46**, 83-90.
- Sano, Y. and Marty, B. (1995) Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, **119**, 265-274.
- Sharma, T. and Clayton, R.N. (1965) Measurement of ¹⁸O/¹⁶O ratios of total oxygen of carbonates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **29**, 1347-1353.
- Sturchio, N.C., Keith, T.E. and Muehlenbachs, K. (1990) Oxygen and carbon isotope ratios of hydrothermal minerals from Yellowstone drill cores. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, **40**, 23-37.
- Tadokoro, K., Ando, M. and Nishigami, K. (2000) Induced earthquakes accompanying the water injection experiment at the Nojima fault zone, Japan: Seismicity and its migration. *J. Geophys. Res.*, **105**, 6089-6104.
- 角皆 潤 (1997) 海洋におけるメタンブルームの炭素安定同位体比測定. 月刊地球, 号外, **18**, 93-98.
- Ueda, A., Kawabata, A., Fujimoto, K., Tanaka, H., Tomita, N., Ohtani, T. and Ito, H. (1999) Isotopic study of carbonates in Nojima fault cores. *Proceedings of the International Workshop on the Nojima Fault Core and Borehole Dataanalysis*, 127-132.

(2003年9月10日受付, 2003年12月25日受理)