

CO₂ 地中貯留のナチュラルアナログ

— 松代での地化学調査 —

當 舎 利 行* 戸 高 法 文**
牧 野 禎 紀*** 高 橋 浩***

Natural Analogue Study on CO₂ Geological Storage: An Example of the Geochemical Survey at Matsushiro, Central Japan

Toshiyuki TOSHA*, Norifumi TODAKA**,
Sadanori MAKINO*** and Hiroshi TAKAHASHI***

Abstract

Environmental assessments and safety control during and after CO₂ injection are essential for CO₂ geological storage, and we are required to evaluate long-term environmental changes and safety. However, long-term changes are difficult to detect directly because the leakage of CO₂ is expected to be small and the evaluation is, sometimes, requested to cover more than 1,000 years. To solve this problem, a natural-analogue study, which inquires into environmental changes at present through a comparison with past geological phenomena, is one possible approach.

When the Matsushiro earthquake swarm began in 1965, a large volume of subsurface water accompanied by CO₂ gas was discharged along fracture zones. A natural-analogue study on the CO₂ discharge during the earthquake swarm should be helpful to create a scenario of leakage and a guideline for the safety of CO₂ geological storage. Surveys of the CO₂ content in soil gas and CO₂ flux emissions from the surface were carried out with carbon isotope ratio measurements to understand the current state at Matsushiro, and to make a conceptual model for environmental assessments and safety control. From geological and geophysical points of view, it is said that deep water gushing out from the surface caused the swarm of earthquakes. As this deep water is still gushing out, we planned to measure CO₂ concentrations in soil gas and CO₂ flux to examine present CO₂ activities at Matsushiro. Because CO₂ in the soil is also produced by activities of microbes, however, we decided to measure the isotope ratio of the carbon to distinguish CO₂ in deep groundwater origin from that produced by microbes.

We selected five survey lines and three survey areas based on previous geochemical measurements and fissure distribution during the earthquake swarm, and measured CO₂ concentration in soil, CO₂ flux, and isotope ratio. Although there were survey points on the thick fan deposit where CO₂ concentration in the soil and CO₂ flux were high, the isotope ratio indicated that

* 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門

** 電源開発株式会社

*** 産業技術総合研究所地質情報研究部門

† 現所属：新エネルギー産業技術総合開発機構

* Institute for Geo-Resources and Environment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

** Electric Power Development Co., Ltd.

*** Institute of Geology and Geoinformation, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

† Present address: NEDO

the carbon is produced by the activity of microbes. On the other hand, the isotope ratio of the samples collected from the thin fan deposit area shows deep subsurface water as the origin. An investigation well was drilled into the basement. Subsurface water samples were collected near the bottom of the well in the igneous rock formation. Geochemical analyses and carbon isotope ratio measurements show higher concentrations of chloride and abiogenic CO₂, indicating that groundwater of a deep origin with CO₂ is still rising.

We are now making a conceptual model of hydrogeological history at the next step. This natural analogue study of CO₂ seepage could indicate the importance of understanding shallow hydrogeological characteristics in a CO₂ storage field.

Key words : CO₂ geological storage, natural-analogue study, risk assessment, Matsushiro earthquake swarm, CO₂ concentration in soil gas, CO₂ flux, carbon isotope ratio

キーワード : CO₂ 地中貯留, ナチュラルアナログ研究, リスク評価, 松代群発地震, 土壌 CO₂ ガス濃度, CO₂ フラックス, 炭素同位体比測定

I. はじめに

CO₂ の地中貯留や放射性廃棄物の地層処分などを実現するにあたっては、数百年から数万年の時間にわたって放射性物質や CO₂ などが地中に留まっていることを示す必要がある。しかし、このような長期間の検証作業は観測からは事実上不可能である。そこで、過去に発生した地下からの元素放出などの事例について、現在までの時間経過の中でその影響を追跡し、長期間の現象について理解を深めるナチュラルアナログ研究の手法が有用と考えられる。

地層処分でのナチュラルアナログとしてアフリカのガボン共和国のオクロウラン鉱床での例がある。この鉱床は約 20 億年前に形成されたとされているが、自然発生的に核分裂連鎖反応が生じ、核分裂生成物や超ウラン元素が地層内に放出された。しかし、発生した放射性元素の多くが 20 億年経過した現在まで地表に漏洩せず、地下に安定に留まっていることが確認されている (Curtis *et al.*, 1989)。これは、アパタイトなど鉱物中に上記の放射性元素が取り込まれたためであり、特定地質条件下では放射性物質の長期的地層内隔離が可能なことを示す事例とされている。CO₂ 地中貯留の場合でも、CO₂ が長期にわたって貯留層内に貯留される地質条件を調べれば、同様なナチュラルアナログ研究が適用できる。地中にト

ラップされる自然現象への調査研究は貯留現象へのアナログ研究であり、逆に、地下から CO₂ が噴出した事例は貯留の安定性が破壊された漏洩現象への研究とみなすことができる。

大陸周辺の活動的縁辺域にあたる我が国では火山や断層系が発達し、それらを通じた CO₂ の地表への漏洩が地中貯留における最も懸念される現象と考えられる。断層系からの大規模な CO₂ の漏出に対する過去の事象として、長野県埴科郡松代町（現在の長野市松代町）で発生した松代群発地震がある。1965 年 8 月から始まる松代群発地震では、有感地震 6 万回、無感を含めた総回数が 72 万回を超える地震が 1967 年 10 月までのほぼ 2 年間にわたって発生した (石川, 2006)。この群発地震は、深部地下水の上昇が地震を発生させた水噴火とされており (中村, 1971; 大竹, 1976), 1995 年の兵庫県南部地震でも同様に地下深部の流体が地震に伴って噴出した (佐藤ほか, 1995)。松代群発地震では、このとき地下から上昇した水に CO₂ が含まれていたため、地震は大量の CO₂ の噴出を伴ったが、幸い人的被害は報告されていない。この CO₂ の噴出は水の噴出に伴って断裂沿いに発生したと考えられ、地震とそれに伴う水噴出のメカニズムの解明は、CO₂ 地中貯留にとって漏洩事象や漏洩評価へのナチュラルアナログ研究となりうる。そこで、40 年前に生じた水と CO₂ の大量噴出、および、それらの

現在の漏洩の実態を把握し、モデルを構築してシミュレーションを行うことによりCO₂貯留に関わる安全性評価のための事例研究（小出ほか, 2006; 戸高ほか, 2006）とするため、松代地域にて調査を行った。

本報告では、現在の状況を調査することにより、深部地層水およびCO₂移動メカニズムについての検討と、このような調査における技術的問題点を議論する。こうして得られた知見は松代群発地震での深部地下水の爆発的噴出に関するシミュレーションモデル構築に有用であり、CO₂の漏洩シナリオ作成に寄与すると考える。なお、本研究では、松代盆地の主要部である瀬関・牧内地区、千曲川氾濫域に隣接する加賀井地区での調査を主に実施し、奇妙山を越えて北東に位置する若穂地区にて比較調査を実施した。この若穂地区は地形や土地利用が酷似しているものの松代群発地震に伴う割れ目帯などの発生域からは外れている。

II. 松代地域の地質と松代群発地震

1) 地質の概略

松代がある長野県北部は約2,000万年前に石英閃緑岩の貫入により隆起した（Nakamura and Tsuneishi, 1967; 中村, 1971; 図1）。その後松代地域では、更新世から完新世にかけて藤沢川、蛭川および神田川により複合扇状地が発達した。扇状地の扇頂部はいずれも崖錘および沖積錐と接しており、扇央部には天井川が発達している。国立防災科学技術センター（現；防災科学技術研究所）は、加賀井地区（図2参照）で掘削長1,934 mボーリング調査を実施し、表層から97 mまでは未固結堆積物、下位は1,386 mまでは破碎されているところが多い頁岩および砂岩（所々に玢岩が貫入）、1,386 ~ 1,680 m間は主に保科玄武岩類、それ以深は石英閃緑岩が分布していることを明らかにした（高橋, 1970）。浅部の破碎されているところは、低比抵抗帯をなしていることから、温泉などの含水帯水層であると考えられている。瀬関・牧内地区では掘削深度70 ~ 80 mのボーリングが実施されたが、いずれも扇状地堆積物内の

掘削であり基盤岩である火山岩類には到達していない（飯島, 1969）。このことから、瀬関・牧内地区では、数10 mから100 m以上に達する厚い未固結堆積物が扇状地を埋めていると推定されている。小野（1967, 1969）は、松代群発地震直後に電気探査を実施し、松代地域の電気構造断面図を作成した。この構造断面図では、牧内、瀬関から千曲川に向かうにつれて100 Ωm層が徐々に深くなる傾向があり、最深部の深さは200 m以上と読み取れる。また、瀬関を越えたところで100 Ωm下位の200 Ωm層が急激に上昇していることから、断層の存在が示唆されている。一方、加賀井地区はそれより南東の瀬関・牧内地区とは明らかに比抵抗構造が異なり15 ~ 20 Ωmの低比抵抗帯が存在し、塩分濃度の高い（あるいはCO₂を多く含む）含水層に相当する可能性が考えられる（図1b）。

2) 松代群発地震

1965年から発生した松代群発地震の5つの活動時期については、以下のようにまとめられている（大竹, 1976）。第1活動期（1965.8 ~ 1966.2）では、震源の深さは7 km以浅で震央は皆神山を中心とする直径8 kmの円内に限られる。第2活動期（1966.3 ~ 1966.7）では、震源域の中心位置は変わらないものの活動域は直径11 km程度に広がり、地震活動が最も活発となった。第3活動期（1966.8 ~ 1966.12）では、震源域が、北東~南西方向への広がりを呈した。この期には地殻変動が最も活発となり、地震発生以来最大の水平伸縮、上下変動を示している。地殻変動は、皆神山の北東麓を中心として最大隆起量は70 cm余りであり、隆起域は10 kmの遠方にまで及んでいた。水平方向の変動は、東西圧縮、南北伸張であり、松代にて発生した断層帯・地割れ帯の左横ずれ変位をもたらしている。

この第3活動期には大量の水が地表に湧出し、牧内地区では地すべりが発生した。この湧水は、多量のCO₂ガスを気泡として含みNa⁺、Cl⁻、Ca²⁺を溶かし込んだ水であり、その総量は、地質学的推定から1,000万m³（中村, 1971）、測地学的観測結果から2,000万m³（神定, 2006）と

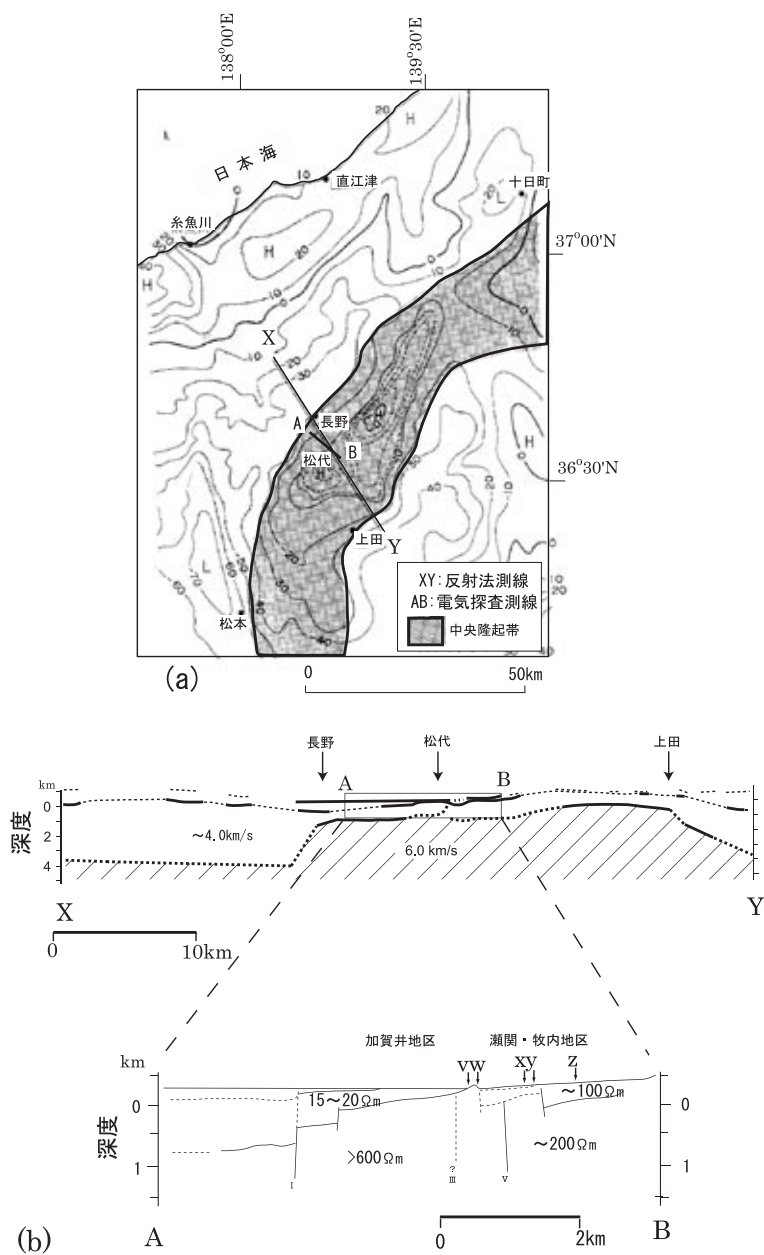


図 1 長野県北部の地球物理学的観測図。

(a) 重力異常図 (Kono *et al.*, 1982 より), (b) 地震波探査 (XY 測線: 上図) と電気探査 (AB 測線: 下図) による地下断面図 (Asano *et al.*, 1969a, b および 小野, 1967 を簡略化)。基盤と考えられる 6 km/s 層が長野～松代～上田にかけて隆起しており、重力の高異常域に対応している。松代付近では、基盤に対応する 200 Ωm を超える高比抵抗帯が比較的浅部に存在している。加賀井地区と瀬関・牧内地区とは基盤以浅の比抵抗構造が異なる。

Fig. 1 Geophysical survey maps of the area around Nagano Basin in northern Nagano Prefecture. (a) Gravity anomaly map (after Kono *et al.*, 1982), (b) Cross-sections of seismic velocity (top figure) and electrical sounding (bottom figure) simplified from Asano *et al.*, 1969a, b and Ono, 1967, respectively. A basement with a seismic velocity of 6 km/s is located in a shallow layer under Nagano, Matsumoto, and Ueda, which is concordant with a high gravity anomaly. High resistivity of more than 200 Ωm is found in the shallow layer at Matsumoto. Resistivity in the shallow layer differs between Kagai and Sezeki/Makiuchi districts, suggesting an underlying fault.

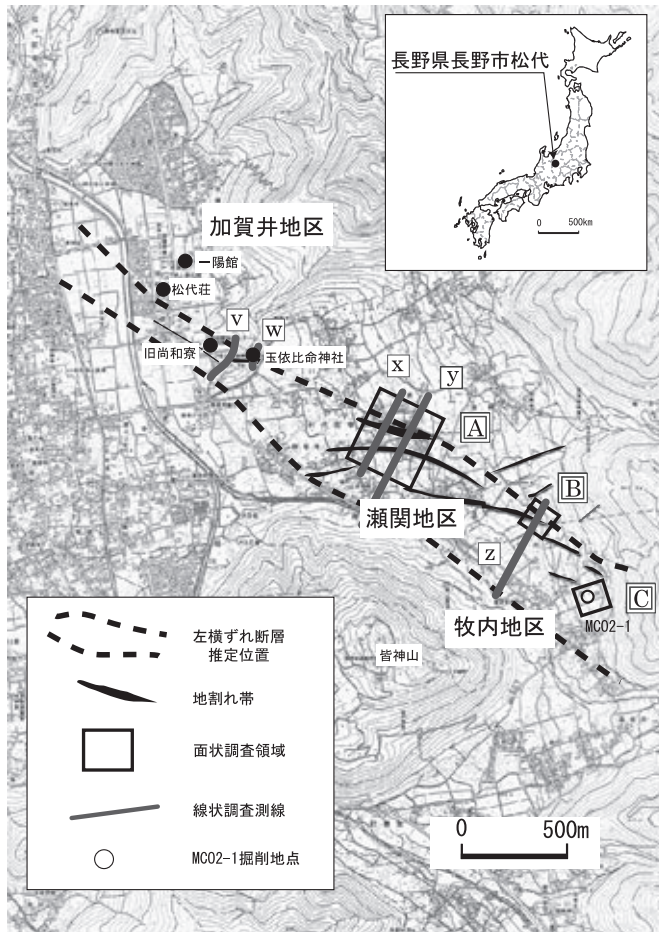


図 2 松代での地化学観測（土壌 CO₂ ガス濃度・フラックス強度）測定地点。エシェロン状に並ぶ塗りつぶした領域と 2 本の破線は、松代群発地震による地割れ帯分布と地下の左横ずれ断層の位置を表す(Nakamura and Tsuneishi, 1967)。面状調査は、A, B, C 地域で実施し、線状調査は、v, w, x, y, z 測線で実施した。地形図は、国土地理院発行 2 万 5 千分の 1 地形図信濃松代を使用した。

Fig. 2 Observation points for geochemical surveys (soil CO₂ gas and flux surveys). Solid symbols and two dashed lines indicate fractures and the boundaries of the left-lateral fault zone at the Matsushiro earthquake (after Nakamura and Tsuneishi, 1967). Areal surveys were carried out at the square denoted by areas A, B, and C. Five line surveys at lines v, w, x, y, and z were also conducted. A topographic map with a scale of 1/25000 titled "Shinano Matsushiro" and prepared by the Geographical Survey Institute was used as a base map.

見積もられている。この湧水の影響は、加賀井温泉一陽館の湧出量の変化や塩素イオン (Cl⁻) 濃度の変化にも現れており、Cl⁻濃度は第 3 活動期前半の 1966 年 9 月頃を境に 3 倍に増加して約 5,000 mg/l まで急上昇した (春日, 1967) (図 3)。この Cl⁻濃度は、その後 40 年間再び松代地震以

前の 1,500 mg/l 程度までは戻らず高い状態で安定している (奥澤・塚原, 2006)。

第 4 活動期 (1967. 1 ~ 1967. 5) に入るとより震源域が拡大した。周辺部は、地震活動が活発になったが、松代盆地の地震活動は沈静化するとともに、震源の深さは増加し、やや深い (震源深

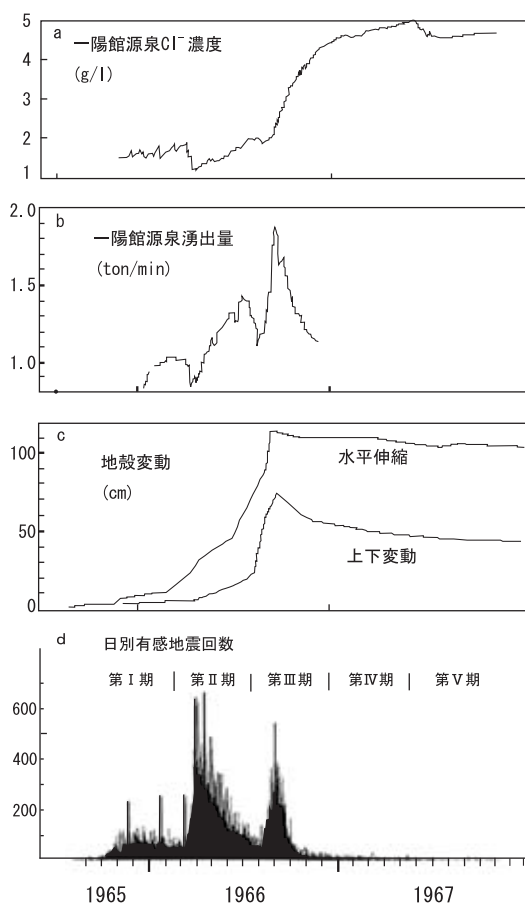


図3 松代地震時の日別有感地震回数（気象庁，1968に
加筆）と（a）一陽館源泉塩素イオン濃度の変化
（野口ほか，1969），（b）一陽館源泉湧出量（春日，
1967），（c）地殻変動量（大竹，1976のまとめによる；
水平伸縮は皆神山-可候峠基線の伸び，上下変動
は地震研究所特設水準点Cの隆起量を示す）。

Fig. 3 Daily activities of earthquakes felt during the
Matsushiro swarm (modified from JMA, 1968).
(a) chlorine ion variations at a hot spring in Ichi-
yokan (Noguchi *et al.*, 1969), (b) Discharge at a
hot spring in Ichiyokan (Kasuga, 1967), (c) Tec-
tonic movement (after summary by Otake, 1976;
the horizontal and vertical movements show the
expansion and contraction of the baseline be-
tween Mt. Minakami and Sorobeshi Pass and the
temporal level point installed by the Earthquake
Research Institute.).

度およそ 15 km) 地震が現れるようになった。
第5活動期(1967.6～)は，群発地震の終息期
にあたる。

III. 松代での CO₂ ガス調査

40 年前に CO₂ を伴う大量の湧水が発生した地
点を中心に現在の状況を調査した。調査は，松代
地震時に地割れ帯が多く発生した皆神山北域の瀬
関・牧内地区を主調査地域として，測線を設定し
て行う線状調査を5測線(v, w, x, y, z 測線)，
区域を設定した面状調査を3エリア(A, B, Cエ
リア)とした(図2)。測定点間隔は，線状調査
と面状調査ともに20 mを標準とした。なお，各
測定点は，測線調査では測線に対し原則北から番
号で，面状調査エリアではエリアごとに東西方向
に西からa, b, cを，南北方向に北から1, 2, 3
を振った座標で表している。

調査の内容は，土壌 CO₂ ガス濃度測定，フ
ラックス測定，炭素同位体比測定である。まず，
広域的な土壌ガス濃度測定を行って大局的な分布
を把握し，その中からフラックス測定を実施する
範囲を決定した。また，CO₂ は地表付近の土壌
生物による有機物の分解によっても生産されるこ
とから，地表付近の有機物起源の CO₂ と深層地
下水からの CO₂ を区別することが必要である。
有機物起源の炭素は，生体の同位体分別作用によ
り，地中や大気中の同位体比よりも¹³Cが少ない。
そこで，比較的高い CO₂ フラックスが観測
された地点で数カ所からガス試料を採取して炭素
同位体比測定も実施した。また，比較のために国
民宿舎松代荘の温泉中に含まれる CO₂ の炭素同
位体比も測定をした。

調査は，2005年11月と2006年12月に分け
て実施した。2005年の調査では，広域的な土壌
ガス濃度測定によって濃度の高い地点を抽出し，
その地点を中心にフラックス測定と同位体比測定
を実施した。また，2006年の調査では，前年の
調査で詳細な調査が必要とされた2地点におい
て1 m 間隔でフラックス調査を実施し，フラッ
クスが比較的高い測定点の同位体比測定を実施し
た。

1) 土壌 CO₂ ガス濃度測定

本測定の前に、土壌 CO₂ ガス濃度の日々の変化を1週間にわたって予備観測したところ、気温や天候に影響されず1昼夜でほぼ一定濃度となった。この結果を考慮して土壌ガスの採取は、(1) ボーリングバー (φ12 mm, 深さ 865 mm) を用いて削孔を行い、口元を空気の混入がないようにゴム栓等で閉塞したガス採取管を挿入、(2) 注射器にてガス採取管内に残っている大気の吸引を行い1日放置、(3) 採取するガスの性質が安定したことを確認するため酸素濃度計を使用して酸素濃度測定を行ってから、(4) 注射器をつなぎ、吸引することにより土壌ガスを採取し、ガステック社製の CO₂ ガス検知管を使用して CO₂ 濃度を測定した。なお、炭素同位体比測定のためのガス試料は、上記 (1) ~ (4) の手続きを行った上で、(5) 注射器にて試料ガスを採取した後、試料ビンにガスを注入して試料とした。

測定の結果、瀬関・牧内地区の土壌 CO₂ ガス濃度は、300 ~ 52,000 ppm の範囲であった。このガス濃度は、大気中の値 (約 380 ppm) に比べ高濃度であり、A エリアでは南西部と北東部に、B エリアでは南西側に、また、C エリアでは西側において観測されており、比較的狭い範囲にスポット的に分布している (図4)。この高濃度区画は松代地震時の地割れ帯と必ずしも一致しているとはいえないが、深部からの CO₂ ガスが噴出場所を変えて地表に漏洩している可能性も考えられる。また、加賀井地区と瀬関地区との境にある v, w 測線 (図2 参照) でも土壌 CO₂ ガス濃度測定を実施した。この測線は松代群発地震にて大量の水が地表に湧出した第3活動期から18年後の1983年に地質調査所により濃度測定が行われている (地震予知・地球化学的研究グループ, 1984)。このときの結果では、v, w 測線にて 50,000 ppm (5%) を超える土壌 CO₂ ガス濃度が測定されている。特に、v 測線では 60% を超える地点もあった。2005年の測定では、1983年度の測定と同一の地点ではないものも、高い土壌 CO₂ ガス濃度が観測された。ただ、その最高値は 26,000 ppm であり、高い値を示す隣の地点の

濃度は 6,000 ppm に落ちるなど、一様に高い値を呈していた1983年当時と最高濃度値は10分の1以下になり、分布もまばらになるなど異なる様相を示していた (図4c 参照)。また、w 測線近傍の玉依比命神社で1995年10月には1%前後 (清水ほか, 1998) であったが、今回の調査では同神社のほぼ同一測点で 2,400 ppm と小さかった。測点のわずかな違いや微生物活動などの影響で必ずしも比較できないが、地下深部からの CO₂ ガスの放出量が減少している可能性がある。

松代地域の北東に位置する若穂地区でも同様の手法で土壌 CO₂ ガス調査を実施した。若穂地区は、地形および土地利用状況が松代地域と類似しているが、松代群発地震時に地割れや水の噴出などは発生していない。CO₂ 濃度の測定結果は最大 16,000 ppm であり、松代地域の土壌ガス濃度と比較すると低い値となっている。したがって、土壌 CO₂ ガス濃度の測定からは、松代地域では深部からの CO₂ ガスの供給が依然続いていることが示唆される。

2) フラックス測定

CO₂ フラックスの測定には、チャンバー内のガスを循環させて赤外線吸収法で CO₂ 濃度を測定するイタリア West Systems 社製の Carbon dioxide flux meter を用いた。チャンバーを地表に置き、チャンバー内の CO₂ ガス濃度の上昇率 (Slope: ppm/sec) にチャンバー内容量、気温、気圧によって決まる係数 (AcK: Accumulation chamber Constant) を乗じてフラックス値を算出する。

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ Flux (g/m}^2\text{/day)} \\ = \text{Slope (ppm/sec)} \times \text{AcK} \end{aligned} \quad (1)$$

AcK の値には、計測器マニュアルに一覧表として掲示されているものを用いた (25°C, 1気圧では、0.318)。チャンバーの底面は半径 20 cm 円形であり、一回の測定で約 314 cm² からの平均フラックスを測定する。

CO₂ フラックス測定は、土壌 CO₂ ガス濃度面状調査にて高濃度が観測された地点を中心に実施した (図2)。調査エリアの北西にある v 測線は

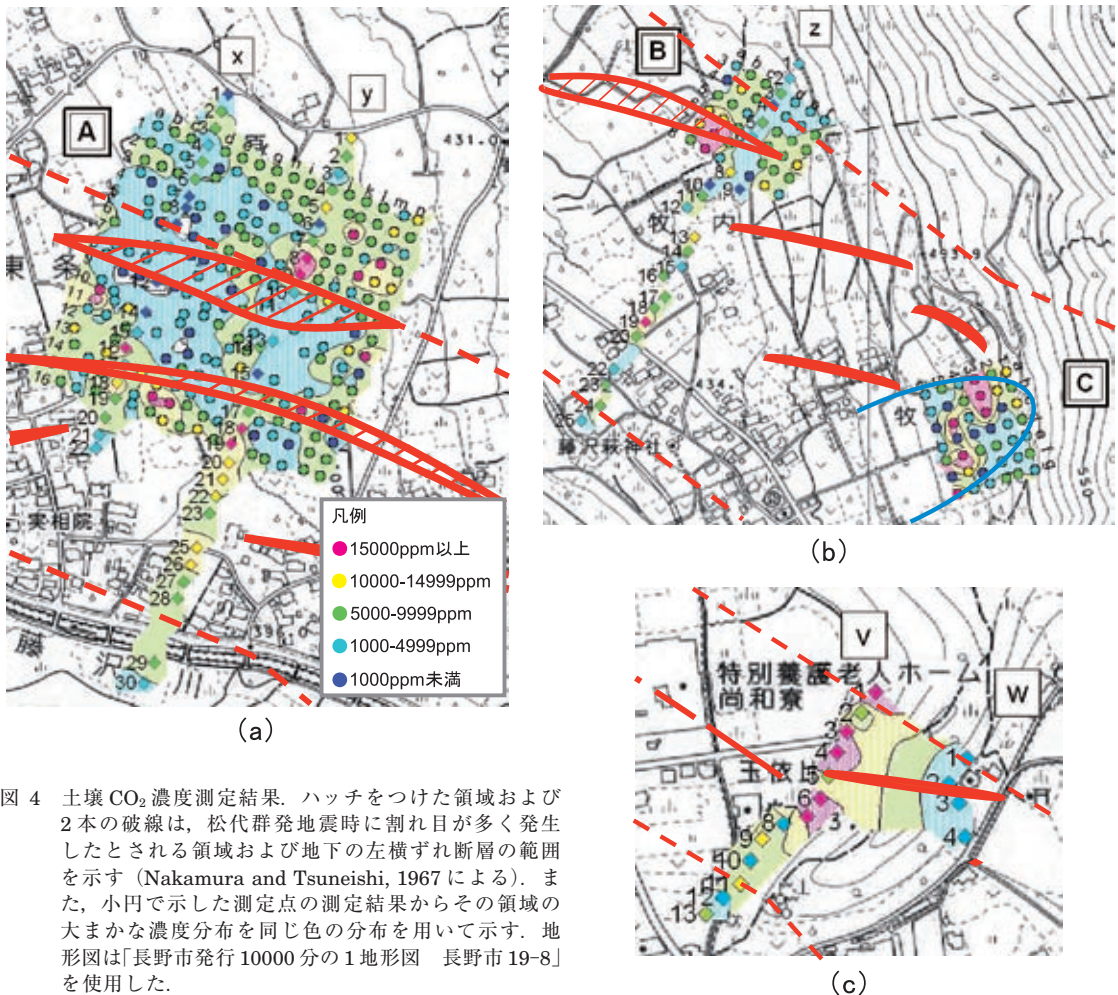


図 4 土壌 CO₂ 濃度測定結果. ハッチをつけた領域および 2 本の破線は、松代群発地震時に割れ目が多く発生したとされる領域および地下の左横ずれ断層の範囲を示す (Nakamura and Tsuneishi, 1967 による). また、小円で示した測定点の測定結果からその領域の大まかな濃度分布を同じ色の分布を用いて示す. 地形図は「長野市発行 10000 分の 1 地形図 長野市 19-8」を使用した.

- (a) A エリアと x, y 測線での土壌 CO₂ ガス分布測定結果. A エリアの北東と南西に土壌 CO₂ 濃度が比較的高い測定地点が分布するが、松代群発地震時の割れ目帯の分布とは一致しない.
- (b) B, C エリアと z 測線での土壌 CO₂ ガス分布測定結果. B エリアでは高い土壌 CO₂ ガス濃度を示す地点 (Bb7) は松代地震時の割れ目帯の中にあり西側に高い観測値を示す地点が分布している. C エリアでは、中央部に高い土壌 CO₂ ガス濃度を示す地点があり地震時の発生した土砂崩れ (青線にて示す) の中心部分に一致している.
- (c) v, w 測線での土壌 CO₂ ガス分布測定結果. v 測線に高い測定値を示す地点がある.

Fig. 4 Soil CO₂ gas concentration distribution. Hatched area and two dashed lines indicate fractures and the boundaries of the left-lateral fault zone at the Matsushiro earthquake (after Nakamura and Tsuneishi, 1967). Areal distribution of soil CO₂ gas was estimated from the survey results marked at the small circle. The distribution is adjusted to have the same scale in the survey results. The topographic map 1:10000 titled "Nagano City 19-8" and prepared by Nagano Local Government was used as a base map.

- (a) Survey results for soil CO₂ gas concentration at area A and along the lines x and y. There are high CO₂ gas concentrations in the northeastern and southwestern areas.
- (b) Survey results for soil CO₂ gas concentrations at areas B and C and along the line z. Bb7 is located within the fracture zone of the Matsushiro earthquake, and is the highest CO₂ gas concentration point in this study. High CO₂ concentrations were measured mainly at the west side of area B and the central part of area C. Landslides that followed the earthquake are shown by a blue line.
- (c) Survey results for soil CO₂ gas concentration along lines v and w. Survey points with a high soil CO₂ concentration were located along the line v.

土壌ガス濃度が 15,000 ppm 以上の測定結果が出ていたものの、本調査に先立つ予備調査では低フラックスとされたため除外した。2006 年の調査では、旧尚和寮前（現在の尚和寮からは南東）の水田でも測定を行った。2005 年の観測では、これらの高濃度地点にて 20 m 間隔を標準として（一部、10 m 間隔にて）CO₂ フラックス値を測定した。測定点数は、合計 156 点である。しかし、20 m あるいは 10 m 間隔の測定ではフラックス分布の明確な分布傾向が現れなかったため、2006 年の測定では測点間隔は 1 m として、土壌 CO₂ ガス調査で高濃度異常値を示した B エリアの Bb7 地点周辺ならびに加賀井地区 v 測線付近の旧尚和寮前水田で測定を行った。旧尚和寮付近の水田では、水田の底からのガスの噴出が続いており、特に噴出の激しいところでは水田にヒューム管を立てて、ガスを含む水を直接水路に流している（図 5）。2006 年の測定地点数は 113 点であり、基点（Bb7 地点と水田内のヒューム管）を中心として X および Y 方向への距離（m 単位）で各測定地点を表す。X と Y の方向は、Bb7 地点では、東南東および北北東であり、旧尚和寮前水田では、東および北である。たとえば、Bb7 (0, 5) 地点は、Bb7 地点から東南東へ 0 m、北北東へ 5 m 移動した地点である。なお、水路内やコンクリート等の障害物のために測点を確保するのが困難な地点は測定を実施しなかった。

2005 年に実施した広域測定の結果を図 6 に示す。A エリアの南西部（Ac16 ~ Af16 の直線上地点）および B エリアの西部（Bb7 周辺）の 2 地点で高 CO₂ フラックスが観測された。全測定地点の中でフラックスが最高の値（28.7 g/m²/day）を示した地点は B エリアの Bb7 で、土壌 CO₂ ガス濃度も 5.2%（= 52,000 ppm）と最高値を示した。また、Bb7 地点は松代地震時に水やガスの噴出した割れ目帯の中にある。このため、Bb7 周辺の区域では 10 m 間隔での CO₂ フラックスの再測定を行った。しかし、再測定した範囲全体が高いフラックスを示しているのではなく、Bb7 が存在する区画内の数点のみが比較的高いフラックス値を示している。この区画周辺はリン

ゴ畑など農地として活用されているが、Bb7 区画内のみが荒地になっており、作物が育たない土地とされている。このことから、ある程度の CO₂ ガスの噴出が今も続いているものと考えられていたが、フラックスの測定では、測定値は地点によりばらつきが大きく、全体的な傾向はつかめなかった。もう一つの高いフラックスが観測された A エリア南西側（Ac16 ~ Af16）は、松代地震時に断層による割れ目帯のやや南に位置している。この地域でも 10 m 間隔でフラックス値の変化を測定した。測定結果は、比較的高フラックス値を示しているがフラックス量が一定せず、安定的なフラックスとは異なる時間変動する CO₂ が混入している可能性も考えられる。

2006 年の測定は、高土壌 CO₂ ガス濃度と高フラックスが測定された B エリアの Bb7 区画内および旧尚和寮前水田内ヒューム管を中心とした区域にて詳細測定間隔（1 m 間隔）での測定を実施した。これらのフラックス測定結果を図 7 に示す。Bb7 周辺にてフラックスが最高値（24.5 g/m²/day）を示した地点は Bb7 から北北東へ 5 m 離れた Bb7 (0, 5) であった。フラックスの全体の傾向としては、最高値観測点を含む北東側に比較的高い値を示す地点が認められた。2005 年の測定にて高い測定値を示した Bb7 (0, 0) のフラックス値は、2006 年度の測定では 8.58 g/m²/day とやや低い値を示している。これは、測量の誤差により前年と同一の地点での計測ができなかったこと、あるいはフラックス自体が変動していることが考えられる。フラックスの変動の原因としては、深層からのガスの流れの変化ならびに地表生物活動の違いが考えられる。ただし、2005 年も 2006 年も観測は冬期に実施しており地表生物の活動差は大きくないと推定されることから、深部からのフラックス値の変動、地点測定の誤差、ならびに検出器と地面とのカップリングなどの測定上の誤差が考えられる。

加賀井地区旧尚和寮前水田にてフラックスが最高値（1,420 g/m²/day）を示した地点は、ガスが常時湧出するヒューム管傍の、管から東へ 1 m 離れた Ta (1, 0) であった。それ以外の比較的



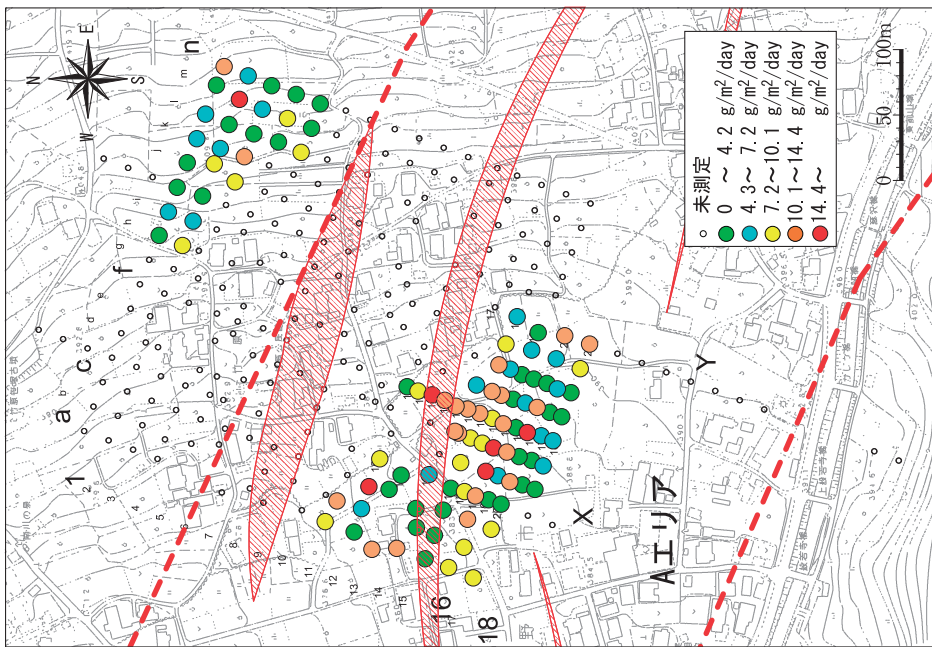
図 5 加賀井地区, 旧尚和寮前の水田の写真. (a)全体外観; 気泡があちこちで発生している. (b) ヒューム管の中; 管を通して CO_2 が噴出している. (a) の写真の右端の工作物がヒューム管と CO_2 を流出させるためのドレイン. 図 7b 参照.

Fig. 5 Photos of the Kagai area. (a) Overview of rice field. Small bubbles of CO_2 were found in the water. The rightmost structures of the figure are a concrete tube and a drain to release discharged CO_2 bubbles. (b) The concrete tube. Continuous CO_2 emissions through the tube are observed. Refer Fig. 7b.

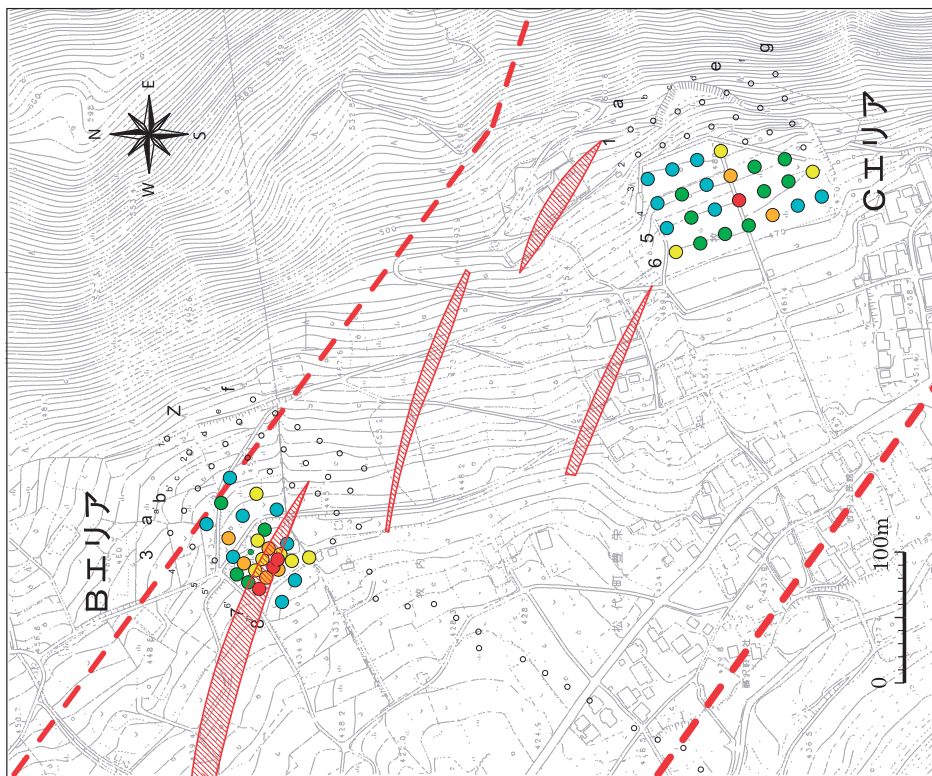
高い値を示す地点はいずれもコンクリートの仕切りから東側の地点に集中した。これは、 ν 測線に近づくにしたがって土壌 CO_2 濃度が上昇する 1983 年の調査(地震予知・地球化学的研究グループ, 1984) と調和的な傾向である。

3) 炭素同位体比測定

2005 年の面状調査にて高濃度の CO_2 ガスが検出された Aa11, Bb7, Ce5 の三地点から分析用の試料を採取した。また、比較のため松代荘の源泉と若穂地区でもガス試料を採取した。2006 年



(a)



(b)

図 6 フラックス測定結果。ハッチをつけた領域および2本の破線は、松代群発地震時に割れ目が多く発生したとされる領域および地下の左横ずれ断層の範囲を示す (Nakamura and Tsuneishi, 1967 による)。先行して実施された土壌CO₂ガス調査でのガス濃度が高い地点を中心に調査点を選定した。また、一部の地点は、標準の20 m 間隔に加えて10 m 間隔での測定を行った。地形図は「長野市発行10000分の1地形図 長野市19-8」を使用した。

Fig. 6 CO₂ Flux survey results. Hatched area and two dashed lines indicate fractures and the boundaries of the left-lateral fault zone at the Matsuhiro earthquake (after Nakamura and Tsuneishi, 1967). The measurements were carried out at the survey points where higher soil CO₂ gas concentrations were detected at a 20 m interval, but in some areas a 10 m interval was adopted. The topographic map 1:10000 titled "Nagano City 19-8" and prepared by Nagano Local Government was used as a base map.

(a) Survey results at area A. (b) Survey results at areas B and C.

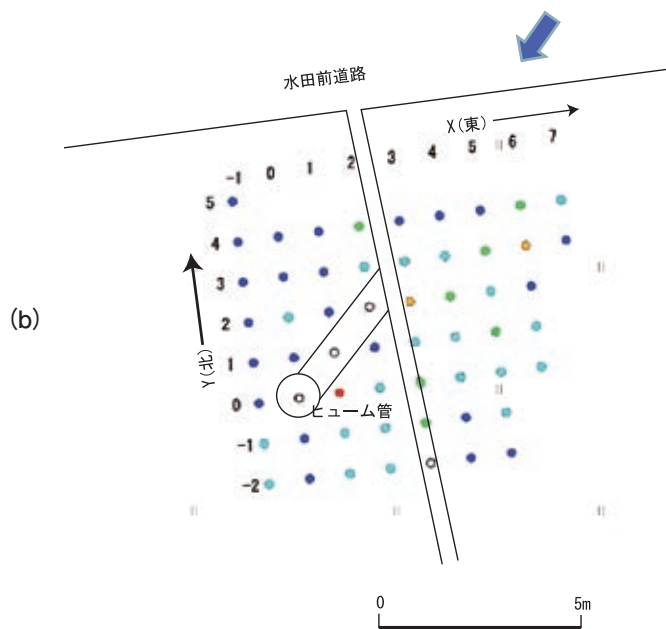
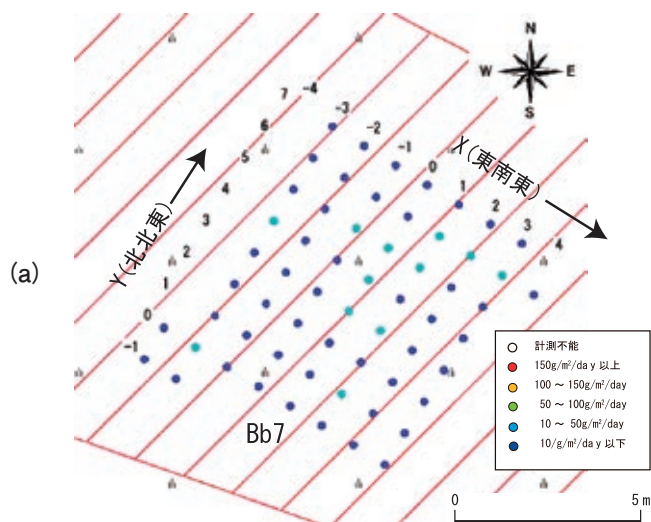


図 7 2006 年のフラックス測定結果。1 m 間隔で測定点を設定した。

- (a) 瀬岡・牧内地区にある Bb7 地点の周りの測定結果。Bb7(0, 0)地点は、2005 年の測定では比較的高い値(28.7 g/m²/day)を示した。赤のハッチは松代群発地震時に割れ目が多く発生したとされる領域。
- (b) 旧尚和寮前水田での 1 m 間隔によるフラックス測定結果。最大値は、ヒューム管そばの Ta(1, 0) 地点での計測値(1,420 g/m²/day)であるが、北東方向に計測値の高い地点がならぶ。大きな矢印は、図 5a の写真の撮影方向。

Fig. 7 The results of a CO₂ flux survey in 2006. The measurement points were set at intervals of 1 m.

- (a) The survey results around Bb7 at the Sezeki/Makiuchi district. High fluxes (28.7 g/m²/day) were measured during a survey in 2005. Hatched area indicates a fracture zone associated with Matsushiro earthquakes.
- (b) The survey results for CO₂ flux measurement points at intervals of 1 m. The maximum fluxes (1,420 g/m²/day) were measured at the survey points in the northeast area. The large arrow shows the direction in which the photograph in Fig. 5a was taken.

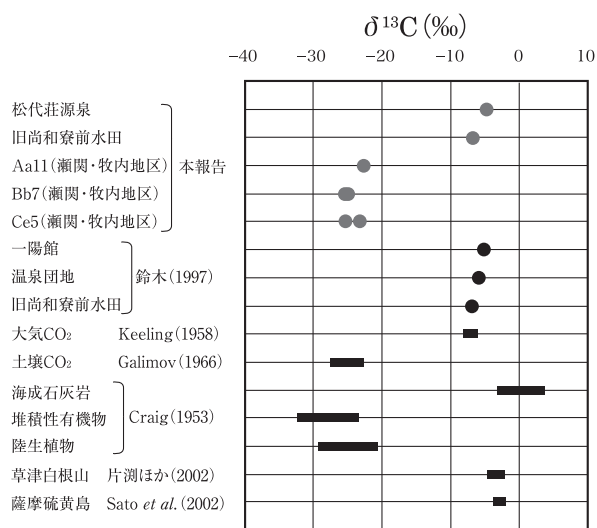


図 8 炭素同位体比組成の比較。瀬関・牧内地区にある Aa11, Bb7, Ce5 地点では、堆積性有機物や陸生植物の持つ炭素同位体に近い値となっており、火山性ガスの持つ値と異なっている。

Fig. 8 Comparison of carbon isotope ratios. The isotope ratios collected at Aa11, Bb7, and Ce5 in Sezeki/Makiuchi district were similar to those of layers of organisms and terrestrial plants, and differed from those of volcano gas.

には、フラックスが比較的高い値を示した地点から試料の採取を行った。試料の採取方法は、土壌 CO₂ ガス濃度測定と同様であり、酸素と CO₂ 濃度を測定した後注射器にて試料ガスを採取し、採取日時、地点名、CO₂ 濃度を記入した試料ビンにガスを注入した。信頼性の高い同位体比測定のためには同一試料を複数回測定して値が一致するかを確認する必要があるため、今回の試料測定では 1 地点で 5 回注射器にて試料ガスを採取し、それぞれの炭素同位体比を計測した。採取されたガスは、連続フロー型炭素同位体比測定装置 (CF-GCMS: Continuous Flow Gas Chromatography Mass Spectrometer) を用いて測定を行った。

2005 年に実施した面状調査の A, B, C エリアでの測定では、Aa11 地点で、-22.5 ~ -22.7 ‰, Bb7 地点で、-25.0 ~ -25.1 ‰, Ce5 地点で、-23.3 ~ -25.4 ‰ の炭素同位体比であり、いずれも ¹³C が少ない結果となった。植物は、光合成の時に ¹³C よりも ¹²C を多く取り込み、植物体も

¹³C が少ない炭素で作られていることから、A, B, C エリアにて採取された CO₂ については植物起源である可能性が高い。2006 年の再調査でも Bb7 地点周辺の 5 試料については、炭素同位体比は -25.76 ~ -26.96 ‰ の値を示し、明らかに植物起源と考えられる炭素同位体比を持つ。一方、旧尚和寮前水田から得られた CO₂ ガスの炭素同位体は、-6.5 ~ -8.0 ‰ の値を示し、大気 (-8 ‰) や海成石灰岩や火山性ガスの炭素同位体比ときわめて近く、土壌 CO₂ や堆積性有機物、陸生植物の値とは異なっていた。また、松代荘の源泉から採取したガスでは、平均 -4.6 ‰ であり、重い ¹³C が多いという結果になっている。炭素同位体比の結果を他の発表された測定値とともに図 8 に示す。植物が育たない環境であるといわれている Bb7 地点などでは、深部地層水の影響を受けた CO₂ ガスの検出が予想されていたものの、1 m 間隔にて細かな測定を行った結果においてもフラックス値は低く、炭素同位体比からも植物起源と推定させる結果となった。一方、気体の流出

が目視でも確認できる旧尚和寮前水田では植物起源とは異なる炭素同位体比が得られ、おそらくは深部起源のガスの噴出が現在でも続いているものと考えられる。

IV. 議 論

1) 松代での CO₂ 調査

瀬関・牧内地区にて土壤 CO₂ ガス濃度を測定した結果、最も高濃度の CO₂ ガスが検出された地点は面状調査 B エリアであり、その測定値は 5.2% であった。群発地震発生時には、土壤 CO₂ ガス濃度は 5～13% と報告されている(永田・伊藤, 1969) ことから、現在においても群発地震時と同程度のガス濃度を有する地域があると考えられる。また、CO₂ フラックス調査では最大 24.6 g/m²/day の測定値が得られた。しかし、比較のために実施した旧尚和寮前水田や火山地域の米国マンモス山での調査では、10³～10⁴g/m²/day のフラックスが観測されており(Lewicki *et al.*, 2006)、瀬関・牧内地区での測定値は 2～3 桁ほど低い値となっている。

土壤 CO₂ ガス濃度が高い地点やフラックス値が高い地点からガス試料を採集して炭素同位体比を測定したところ、瀬関・牧内地区では軽い炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ がおよそ -20%) が得られた。このことから、現地にて観測された CO₂ 高濃度あるいは高フラックスは、土壤生物による有機物分解起源の CO₂ が主成分であると判断される。一方、加賀井地区での測定結果(旧尚和寮前水田および松代荘温泉から採取したガス)では、重い ¹³C が多いという結果になっている。

若穂地区での土壤 CO₂ ガス濃度調査とフラックス測定では、松代地域と同じように土壤ガス濃度や CO₂ フラックス値が高い地点があった。しかし、炭素同位体比測定からこの地域の CO₂ も微生物起源と推定される。このことから、数%の土壤 CO₂ ガス濃度は土壤の微生物の働きでも生成され、土壤 CO₂ ガス濃度だけで地下からの CO₂ の漏洩について議論することは不十分であると考えられる。深部からの CO₂ の検出は、微生物活動の低下する冬季での調査が望ましいとき

れているが、11月あるいは12月に行った今回の調査でも高濃度の土壤ガスが観測されることから、土壤生物起源の CO₂ かどうかを判断するには炭素同位体比の測定が必須と考えられる。

瀬関・牧内地区にある Bb7 地点は荒地となっており植物が育たないとされている。この地点では、土壤 CO₂ ガス濃度が高く、同地区で最も高いフラックスが測定されている。一方、加賀井地区の旧尚和寮前水田では気体放出が肉眼でも確認でき、CO₂ ガスフラックス測定でも高い測定値が測定されていることから CO₂ が放出されていることが明らかであるが、この地点では稲作が行われている。米国マンモス山では CO₂ ガス濃度が高いところでは木が枯れたりする影響が出ているが、加賀井地区での噴出は非常に限られた地点での噴出であることから稲には重大な影響を与えていないと思われる。Bb7 地点では、観測された CO₂ は炭素同位体比測定から土壤微生物起源とされたことから、植物が育たない理由としては水に溶けた Cl⁻ の影響が考えられる。しかし、広域的な流動を伴う地下水の影響であれば比較的広域にその影響が出てくると思えるが、影響を受けている土地が局所的(20 m × 20 m 程度)であり周囲はリング畑になっている。影響が限られていることから、地表までの割れ目を通じて Cl⁻ を含む地下水が上昇しているか、測定にかからない微量の CO₂ ガスが上昇している影響が考えられる。現状の測定システムでは、このような微量の CO₂ フラックスは、生物起源の CO₂ の影響により隠されてしまって測定評価が不可能である。今後は、フラックス測定器や測定方法の改良などにより測定が行えるようにし、微量の CO₂ ガスの長期間の影響についても別途考慮検討すべき事項と考えられる。

2) フラックス測定

CO₂ フラックスは、群発地震時の観測が行われていないことから松代地震当時からの変化は不明であるものの、現在の松代地域での測定値はおおむね 10 g/m²/day 以下の値となっている。この測定値は火山性の CO₂ が噴出している地域(たとえば、米国マンモス山)に比較すると、2～3

桁以上小さな値となっている。

使用した CO₂ フラックス測定器は、CO₂ 濃度の時間変化を測定してフラックスに換算している。したがって、フラックス値 (F) は、

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T A(t) dt \quad A(t) \geq 0 \quad (2)$$

という形であらわされる。ここで $A(t)$ は時刻 t のときのフラックス計チャンバー内の CO₂ 濃度である。濃度 $A(t)$ の関数形は明らかではないが、1次成分が多次成分よりも圧倒的に大きい、すなわち、濃度の時間1次微分であるフラックスは、測定時間内では一定と仮定している。計測にあたっては $A(t)$ の計測誤差を考慮して、 T は1分程度を基本としているが、火山地帯などフラックスの大きな地点では、1分以内の測定でも結果には大きく影響せず、むしろ、CO₂ のチャンバーからのオーバーフローを回避する必要があるため、測定時間を短くしたり大きなチャンバーを用いてオーバーフローを押さええることを行っている。

一方、フラックスがあまり大きくないところの測定では、チャンバー内濃度計測における測定器の計測誤差が入ってくるためフラックス値 (F) は

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T \{A(t) + \delta(t)\} dt \quad (3)$$

となる。ただし、 $\delta(t)$ は濃度測定の誤差である。低フラックスのところでは、 $A(t)$ が $\delta(t)$ と同じ程度の強度であり、計測原理上 $\delta(t)$ が誤差として累積されるため $\delta(t)$ が小さな分析機が必要となる。また、長期間の測定では、チャンバーの下面を通じて CO₂ が漏洩するなどのチャンバーと地面とのカップリングが劣化することも測定誤差となり結果に影響する。この場合は、誤差 $\delta(t)$ は増加せずに減少することとなり、時間とともに CO₂ 濃度が減少して見かけ上負のフラックス計測値となる。このように現状の機器は、火山地帯などの比較的フラックスの高い地域での測定が基

本となっていることから、現状の機器構成においては、低フラックスを精度よくはかることは非常に難しい。精度よく測定するには、チャンバー内の CO₂ が測定中に外部に漏れないように平坦な地形でチャンバーを測定面と平行に設置する、円形のチャンバーの底とかみ合うような円形の台を地面に固定する、粘土を用いてチャンバーと地面の間の隙間をふさぐなどのチャンバーと地面とのカップリングに対して配慮が必要である。

旧尚和寮前の水を張った水田では CO₂ バブルの噴出は間欠的に発生しており、その周期は10秒程度から30秒程度である。CO₂ は定常的に噴出をしているわけではなく、時間的に変動をしている。このような変動している CO₂ 噴出地点でも、噴出量が大きく周期が短ければ、現在の測定装置でも検出は可能である。しかし、噴出量が小さく周期が長い場合には、測定方法の変更が必要となる。このような瞬時値での議論をするためには、短時間の計測で検出感度の高い検出器の開発が必要になることも考えられる。

3) 深部起源の地層水流動

松代群発地震時に多数の割れ目帯が発達した瀬関・牧内地区での土壌 CO₂ 濃度分布調査やフラックス調査では、群発地震時に流出したと考えられる深部地層水起源の CO₂ は確認できなかった。牧野ほか (2006) は、松代群発地震時に多量の湧水による大規模な地すべりが発生した地域 (牧内地区) にて 80 m のボーリング坑 (MCO2-1) 掘削およびサンプラーによる採水を実施した (図2)。掘削の結果、深度 24 m 付近までは表土・地すべり堆積物および崖錐堆積物、24 ~ 65 m 区間は扇状地堆積物、65 ~ 80 m には基盤の石英閃緑岩が分布しており (図9)、孔内水を採水して分析を行った結果、下位の孔内地下水ほど Cl⁻ 濃度や CO₂ 濃度が高く (表1)、HCO₃⁻ の炭素同位体比 ($\delta^{13}C$) も -5.5‰ と火山性起源の値に近かった。このボーリング結果から、地表には現れていないものの、瀬関・牧内地区の堆積物に覆われた石英閃緑岩中には Cl⁻ 濃度が高い深部地層水が存在していることが明らかとなり、瀬関・牧内地区でも高 Cl⁻ 濃度の地層水が引き続き上昇していると考

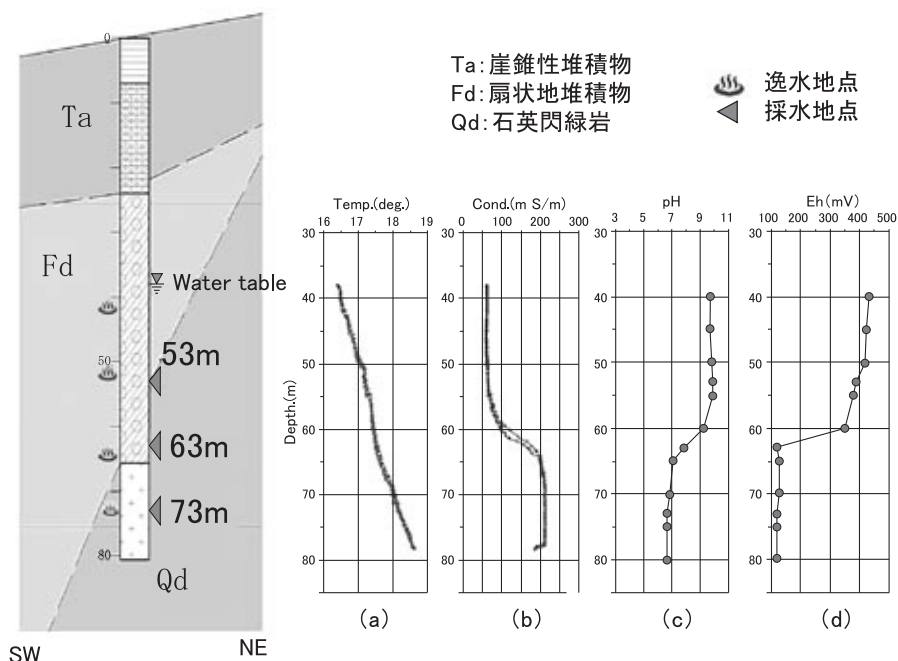


図 9 調査ボーリング MCO2-1 の簡易柱状図と検層結果 (牧野ほか, 2006)。

地質断面図は坑井を含む北東-南西方向の断面図に投影している。検層の結果は、(a) 温度、(b) 電気伝導度、(c) pH、(d) 自然電位を示す。いずれの検層結果も地層境界に対応して 55 m から 63 m の間に測定値が大きく変化をしている。

Fig. 9 Geologic column and logging results at the investigation well MCO2-1 (after Makino *et al.*, 2006). The geologic cross-section is also shown along the NE-SW direction. Logging results are: (a) temperature, (b) electric conductivity, (c) pH, and (d) self potential. All logging data show changes at an interval of depths of 55 m and 63 m corresponding to the boundaries of geological formations.

表 1 調査井 (MCO2-1) での採水化学分析。

Table 1 Chemical analysis of subsurface water using a water sampler in the investigation well MCO2-1.

	Depth m	Temp °C	pH	Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	SiO ₂ mg/l	T-CO ₂ mg/l
1	53	17.2	9.6	112	4.6	3.2	9.5	72.1
2	63	17.5	8.5	121	3.9	8.5	10	137
3	73	18.2	6.9	149	5.2	43.2	13.6	374

えられる。また、松代群発地震の活動期にみられた湧水の中で現在も湧出をしている湧水があることや、加賀井地区の一陽館や他の湧水の Cl⁻濃度が松代地震以降上昇し、現在まで高い値を保っている (奥澤・塚原, 2006) ことなどから、松代地

震を引き起こした深部からの高塩濃度の地層水は現在までもまだ供給されていることが推測される。

地質調査所による 1983 年の加賀井地区での土壌 CO₂ 濃度調査 (地震予知・地球化学的研究グ

ループ, 1984) では、炭素同位体比測定を行っていないことから深部地層水起源の CO₂ である保証はないものの、1983 年と 2005 年の測定 (v 測線) を比べると濃度が 10 分の 1 以下になっている。深部地層水の上昇が続いていると仮定した場合、湧水等で高 Cl⁻ 濃度が続いていることから深部地層水の性質は大きな変化を示していないものの、CO₂ 濃度が減少していることから上昇量が変わったか地表に至る経路が変わったことが予想される。

瀬関・牧内地区での地表調査では、高塩濃度の地層水に付随すると考えられる炭素同位体比の重い CO₂ は検出されなかった。一方、加賀井地区では深部起源の CO₂ が検出されており、現在も高い Cl⁻ 濃度を保って湧出をしている湧水が報告されている。ボーリング調査の結果では、瀬関・牧内地区でも深部地層水の影響を受けている水が確認されている。このことから、瀬関・牧内地区では、深部地層水や CO₂ を地表に露出させない地質的条件があると考えられる。

瀬関・牧内地区では比較的厚く堆積している扇状地堆積物が存在し、電気探査の結果から厚さは 200 m 以上と推定される (小野, 1967, 1969)。この堆積物のため、松代群発地震当時の割れ目が閉じてしまい通路がなくなってしまうか、堆積物の中を流動する浅層地下水により基盤岩内を上昇してきた CO₂ が溶解・移送されるなどのため地表での深部起源の CO₂ が観測されない可能性がある。一方、加賀井地区では、国立防災科学技術センター (現; 防災科学技術研究所) のボーリングデータ (高橋, 1970)、一陽館の温泉掘削での採取コア (春日, 1967) などから比較的浅いところで石英閃緑岩が採石されている。また、ボーリングデータからは、表層から 97 m までは未固結堆積物、下位は 1,386 m までは破碎されているところが多い頁岩および砂岩とされている。この頁岩および砂岩が温泉帯水層や CO₂ 貯留層となっている可能性もある。このような深部からの通路を構成している石英閃緑岩が比較的浅部にまで上昇・定置し、その上部に水理的に流体をためやすい構造があることが理由となって、加賀井地

区では現在でも地表からの CO₂ 流出が生じているものと考えられる (図 10)。

4) 高塩濃度の深部地層水

塚原・吉田 (2005) は、地殻深部の溶融体からの反射とされる強い S 波 (SxS 波) の反射面が松代の地下で観測された (西脇ほか, 1989) ことから、皆神山を形成したマグマが地下で固化するときに放出された流体と CO₂ が上昇通路にて目詰まりを起こし、深部地層流体が深さ 15 km 付近に留まって反射面を形成しているというモデルを提唱した。皆神山の形成時期は 30 ~ 35 万年前と推定されており、マグマの冷却はそれ以降続いていることから、皆神山を形成したマグマは目詰まりを起こした貯留域に高塩濃度の流体と CO₂ が供給し続けていることになる。松代地震時にこれらの高塩濃度流体や CO₂ が地表に噴出するためには、目詰まりとなっている不透水層を破る必要があるが、そのメカニズムについては不明としている。しかし、彼らのモデルを使用すると、皆神山の出現以降、松代地震までに何度かこの不透水層が破られて、大量の CO₂ が噴出したと考えられる。岡本ほか (2006) は、1714 年まで遡って長野県北部の地震活動を調べた。1897 年の上高井地震など群発性の地震が長野県北部で発生しているが、その震源域は松代地域から北東にずれている。松代地域では、年に明治時代に 1 ~ 2 回程度の有感地震が起こっていたとの記録があるのみであり、群発地震の記録はない。また、大量の CO₂ を含む水が噴出したことを示す地質学的証拠も見つかっていない。一方、深部地層水の上昇が原因で松代群発地震が発生したが、地震での人畜への被害は報告されていない。高濃度の CO₂ ガスが何度も噴出して人命が損なわれた火山地帯の CO₂ 噴出と根本的に異なる状況があると考えられる。

CO₂ 地中貯留では、帯水層や枯渇ガス油層に CO₂ が広く分布し長期間貯留される。貯留深度は異なるものの、塚原・吉田 (2005) が提唱するように皆神山下に高塩濃度流体の貯留溜まりがあるとすれば、CO₂ 地中貯留におけるナチュラルアナログ研究の自然事例と考えられる。CO₂

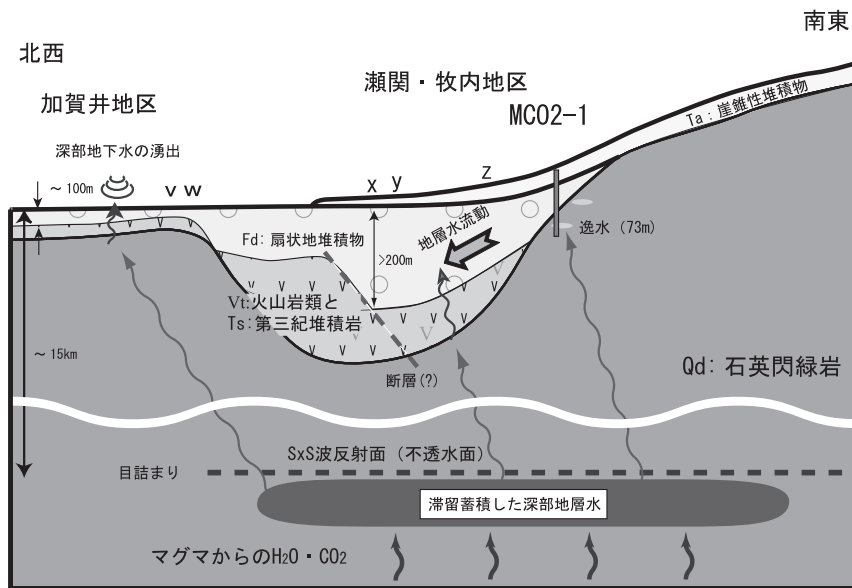


図 10 牧内地区と加賀井地区を結ぶ測線に対する地質概念図。皆神山を形成したマグマが冷却する過程で水や CO_2 が放出された。上昇中に形成された不透水面の下に上昇した深部地層水が滞留したが、松代地震時には不透水面が破られて大量の水が上部に供給され群発地震を起こした(塚原・吉田, 2005)。この深部地層水の上昇は石英閃緑岩中の割れ目を伝って今でも続いており、加賀井地区では地表まで到達する。瀬関・牧内地区では扇状地堆積物が深く堆積しており、上昇した深部地層水は、堆積物内の水に希釈され拡散してしまい、地表には現れてこない。v, w, x, y, z は、おおよその土壌 CO_2 濃度分布での線状調査の位置を示す。電気探査の結果から加賀井地区と瀬関地区との間に断層と基盤の隆起が示唆されている(小野, 1967)。

Fig. 10 Cross-section between Sezeki/Makiuchi district and Kagai district based on a conceptual geological model of Matsushiro. Water and CO_2 were discharged from magma under Mt. Minakami during the cooling process. An impermeable layer was formed by mineral deposits and crystallization of the discharged magma fluid, preventing the magma fluid from migrating upward. Once the impermeable layer was broken at the Matsushiro earthquake, large volumes of water were supplied, causing the seismic swarm (Tsukahara and Yoshida, 2005). The upward movement of the deep formation water still continues through fractures in quartz-diorite, and the groundwater comes to the surface at Kagai district. Deep alluvial fan deposits have formed, and the rising deep water is diluted by water in the deposit and is diffused. There is no surface evidence of deep formation water at Sezeki/Makiuchi district. The marks v, w, x, y, z indicate the locations of survey lines. A fault and the uplifted basement suggested by an electric sounding survey conducted by Ono (1967) are also shown.

地中貯留の実施にあたっては、地中に貯留された CO_2 が長期間安全に留まっていることを提示する必要がある。この地中貯留における安全性を考える上では漏洩が発生するメカニズム、すなわちなぜ貯留層上部の目詰まりを起こしたシール層が破れ松代地震が発生したか、そのメカニズムが解明されれば貯留技術に大きく貢献する。石川(2006)は、上昇した深部地層水が地表まで達した後、地震発生層や下部地殻とは異なる地表付近の応力場によって地層水が拡散し、その一部が再び深部へ還流したことが数多くの地震が発生した

原因であるとした。佃(2006)は、地殻応力の変化により亀裂内に閉じこめられた流体が押し出されて流体の上昇が発生するとしたが、この地殻応力の変化がどの程度必要であるかは示されていない。いずれにしても地下応力場の変化が深部地層水の上昇をもたらした原因と考えている。 CO_2 地中貯留では、 CO_2 を超臨界状態とするため 1,000 m 程度の深度に圧入をすることから、 CO_2 貯留層は松代の高塩濃度流体の貯留溜まりとは深さは異なる。しかし、松代の貯留溜まりで応力の変化によって地震とそれに伴う水の噴出が起こっ

たとすれば、CO₂ 地中貯留にとって一つの漏洩シナリオとなりうるだろう。

V. 結 論

①松代群発地震の主震源域にて土壤 CO₂ ガス濃度と CO₂ フラックスを測定した。同時に計測を行ったガス中の $\delta^{13}\text{C}$ の結果から、一陽館や松代荘のある加賀井地区では、深部地下水起源と思われる CO₂ が流出しているが、皆神山北の瀬関・牧内地区では、土壤微生物等の生物活動による CO₂ が大部分であることが判明した。

② CO₂ フラックス測定では、通常の火山地域での計測に比較して 2～3 桁ほど測定値が低かった。精度をさらに上げた測定値を得ることや、CO₂ の漏洩など低フラックスの測定には、検出部分に検出能力の高い分析ユニットに改良するか、地面と CO₂ を集めるチャンバーとの間の結合を工夫して集積した CO₂ が外に漏れ出さないような対策を施すことが必要である。

③ボーリング調査から瀬関・牧内地区でも松代群発地震を引き起こした深部地層水の上昇が現在でも続いていることが推測される。また、1983 年に加賀井地区で行われた土壤 CO₂ ガス濃度測定との比較では、ガス濃度の減少がみられることから、上昇する深部地層水の総量も減少をしていることが推察される。

④加賀井地区での $\delta^{13}\text{C}$ の高い CO₂ は、深部地層水から分離した CO₂ が地表に流出しているものと考えられる。瀬関・牧内地区では深部地下水起源の CO₂ が地表で観測されなかった。その理由は、地震当時通路として作用していた割れ目帯が閉塞してしまったためか比較的厚く堆積している扇状地堆積物の中を流動する浅層地下水により CO₂ が溶解・移送されるためと考えられる。

⑤深部地層水の起源が皆神山を形成した残存マグマの固化に伴う脱水作用であるとする、皆神山が形成された 30～35 万年前から深部地層水と分離した CO₂ の地表への流出は続いていたものと考えられる。定常的に上昇していた地層水ないしは CO₂ が、どのような条件の下に爆発的に噴出をするのかを確かめるため、本研究での成果

を生かした数値モデルを作りシミュレーションで解明していく必要がある。

謝 辞

本研究は、経済産業省の地球環境国際研究推進事業「ナチュラル・アナログによる二酸化炭素地中隔離の環境影響および安全管理に関する研究」(みずほ情報総研、電源開発、産総研、早稲田大学、ローレンスバークレー国立研究所の共同受託)の一環として実施したものである。事業推進に委員会での各委員ならびに経済産業省の関係各位との議論は非常に有益であった。信州大学塚原弘昭教授には現地の案内をしていただいたほか、貴重な資料の閲覧や深部地層水への助言を賜った。気象庁精密地震観測室(現地磁気観測所)の石川有三室長には、貴重な資料の提出をいただいた。みずほ情報総研(現石油天然ガス・金属鉱物資源機構)の山本晃司氏、早稲田大学の小出 仁教授には、観測や解釈において貴重な助言を賜った。また、炭素同位体測定には産業技術総合研究所の半田宙子さん、現地調査には(株)JP ハイテック岩崎 収氏の協力を得た。産業技術総合研究所の西澤 修氏と土木研究所の稲崎富士氏には、多くの助言を賜った。記して感謝の意を示す。

文 献

- Asano, S., Ichikawa, K., Okada, H., Kubota, S., Suzuki, H., Noguchi, M., Watanabe, H., Seya, K., Noritomi, K. and Tazime, K. (1969a): Explosion seismic studies of the Matsushiro swarm area, Part I. Explosion seismic observations in the Matsushiro earthquake swarm area. *Special Report, Geological Survey of Japan*, **5**, 1-162.
- Asano, S., Kubota, S., Okada, H., Noguchi, M., Suzuki, H., Ichikawa, K. and Watanabe, H. (1969b): Explosion seismic studies of the Matsushiro swarm area, Part II. Underground structure in the Matsushiro earthquake swarm area as derived from explosion seismic data. *Special Report, Geological Survey of Japan*, **5**, 163-203.
- Craig, H. (1953): The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **3**, 53-92.
- Curtis, D.B., Benjamin, T.M., Gancarz, A.J., Loss, R., Rosman, J.K.R., De Laeter, J.R., Delmore, J.E. and Maeck, W.J. (1989): Fission product retention in the Oklo natural fission reactors. *Applied Geochemistry*, **4**, 49-62.
- Galimov, E.M. (1966): Carbon isotopes of soil CO₂. *Geochemistry International*, **3**, 889-897.
- 飯島 弘 (1969): 松代周辺の地表地質と地盤災害. 防災科学技術総合研究報告, **18**, 103-115.

- 石川有三 (2006): 松代群発地震から 40 年. 月刊地球, **28**, 753-757.
- 地震予知・地球化学的研究グループ (1984): 地質調査所における地下水・地下ガスによる地震予知研究の概要 (その 3). 地質ニュース, **359**, 16-26.
- 神定健二 (2006): 松代群発地震を発生させた湧水の上昇プロセス—水準測量・水管傾斜計観測から求められた地殻変動—. 月刊地球, **28**, 823-830.
- 春日 功 (1967): 松代地震による加賀井温泉の変化. 地学雑誌, **76**, 76-86.
- 片渕雄次・大場 武・平林順一・野上健治・大和田道子・水橋正英 (2002): 草津白根山の噴気孔ガスと低温火山ガス. 月刊地球, **39**, 46-51.
- Keeling, C.D. (1958): The concentration and isotopic abundance of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **13**, 322-334.
- 気象庁 (1968): 松代群発地震調査報告. 気象庁技術報告, **62**.
- 小出 仁・山本晃司・戸高法文・中西繁隆・當舎利行 (2006): 松代地震断層の多重エシユロン構造と CO₂ 含有水の力学的相互作用. 月刊地球, **28**, 801-808.
- Kono, Y., Hibi, T., Kubo, M., Synami, M., Michigami, O., Shibuya, K., Furuse, N. and Suzuki, K (1982): Gravity anomaly over the central Japan (1). *Zishin*, **35**, 539-546.
- Lewicki, J.L., Hilley, G.E., Tosha, T., Aoyagi, R., Yamamoto, K. and Benson, S.M. (2006): Dynamic coupling of volcanic CO₂ flow and wind at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California. *Geophysical Research Letters*, **34**, L03401.
- 牧野禎紀・戸高法文・阿島秀司・中西繁隆・當舎利行・宮越昭暢・高倉伸一・岩崎 収 (2006): ナチュラルアナログ手法による CO₂ 地中貯留での環境影響及び安全管理—長野県松代地域における浅層ボーリング調査について—. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会予稿集, L217-P005.
- 永田松三・伊藤司郎 (1969): 松代地震地域における地化学探査 (続報). 防災科学技術総合研究報告, **18**, 29-39.
- 中村一明 (1971): 松代地震から学んだこと. 科学朝日, **10**, 127-133.
- Nakamura, K. and Tsuneishi, Y. (1967): Ground cracks at Matsushiro probably of underlying strike-slip fault origin II -The Matsushiro earthquake fault. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **45**, 417-471.
- 西脇 誠・森田裕一・流 精樹・柿下 毅・長田芳一・永井直昭 (1989): 松代アレイで観測された SxS 波と反射面の検出. 地震学会予稿集, **1**, 184.
- 野口喜三雄・上原精一・西井戸敏夫 (1969): 松代群発地震にともなう温泉水の変化に関する地球化学的研究. 温泉化学, **2**, 68-93.
- 岡本國徳・小林正志・石川有三 (2006): 1965 年 8 月以前の松代群発地震の震源域における地震活動について. 月刊地球, **28**, 852-858.
- 奥澤 保・塚原弘昭 (2006): 松代地震湧出水の化学成分から推定した地震を起こした水の化学組成. 月刊地球, **28**, 776-781.
- 小野吉彦 (1967): 松代地域の電気探査 (I). 防災科学技術総合研究速報, **5**, 23-27.
- 小野吉彦 (1969): 松代地域の電気探査 (II). 防災科学技術総合研究速報, **18**, 23-29.
- 大竹政和 (1976): 松代地震から 10 年. 科学, **46**, 306-313.
- Sato, M., Mori, T., Shimoike, Y., Nagao, K. and Notsu, K. (2002): Carbon isotope systematics of CO₂, CO and CH₄ in fumarolic gases from Satsuma-Iwojima volcanic island, Japan. *Earth, Planets and Space*, **54**, 257-264.
- 佐藤 努・高橋 誠・松本則夫・佃 栄吉 (1995): 1995 年兵庫県南部地震後に生じた淡路島の湧水. 地質ニュース, **496**, 61-66.
- 清水直哉・塚原弘昭・古舘友通・吉田則夫 (1998): 長野市松代地域における炭酸ガスの湧出量と地殻変動. 地震, **51**, 41-50.
- 鈴木まなみ (1997): 松代地域における二酸化炭素とメタン, 炭酸カルシウムの炭素同位体比. 信州大学理学部地質学科卒業論文, **57**.
- 高橋 博 (1970): 松代の深層ボーリングその後と水の圧入実験. 防災科学技術, **30**, 10-13.
- 塚原弘昭・吉田則夫 (2005): 松代群発地震を起こした地下水の素性. 月刊地球, **27**, 453-460.
- 佃 為成 (2006): 深部流体上昇仮説とその検証. 月刊地球, **28**, 813-822.
- 戸高法文・中西繁隆・當舎利行・山本晃司・小出 仁 (2006): 松代群発地震における深部からの上昇流体の物理的・化学的挙動. 月刊地球, **28**, 792-800.

(2008 年 5 月 12 日受付, 2008 年 9 月 3 日受理)