

雲仙地溝東域におけるマグマ性二酸化炭素の寄与について： 土壌ガスと地下水による調査

高橋 浩・風早康平・篠原宏志・森川徳敏・安原正也・稲村明彦・大和田道子

(産総研 地質調査総合センター)

中村俊夫 (名古屋大学 年代測定センター)

要旨—雲仙火山の周辺において、マグマ起源の二酸化炭素の寄与がどのような分布になっているのか、土壌ガスと地下水を用いた観測から議論した。対象としたのは、マグマ起源の二酸化炭素の寄与が高いことがわかっている雲仙地溝の内側の東域である。土壌ガスと地下水のそれぞれで得たマグマ性の二酸化炭素の寄与の空間分布は非常に類似した傾向を示した。これは、土壌ガスと地下水へ供給されるマグマ性の二酸化炭素が同一経路を通して上昇してきたことを示唆するものである。また、断層があると考えられる地点では、高いマグマ性の二酸化炭素の寄与があることが示され、断層がマグマ性の流体の通り道になっていると考えられる。

はじめに

火山からの二酸化炭素放出には、火道を通したものの他に、山体からのじわじわとした放出があることが、数多く確認されている (Farrar *et al.*, 1995; Hernández *et al.*, 2001)。一方で、火山体は豊富な地下水を蓄えており、火道以外から放出される二酸化炭素の一部（若しくは大部分）は、地下水に溶け込んで流出していることも考えられる。調査地域である雲仙地溝の東域は大湧水地域で、大量の地下水が存在している。このような火山の周囲で放出される二酸化炭素は、土壌ガスを通じて放出される成分と地下水に溶け込んだ形で運ばれる成分があり、火山体からの二酸化炭素放出を議論する上で、土壌ガスと地下水の両者に対するアプローチが必要となる。

これまでの土壌ガスや地下水による島原半島における研究により、マグマ性の二酸化炭素の寄与は雲仙地溝の内側の東域で高い傾向を示すことがわかっている (高橋他, 2003, Ohsawa *et al.*, 2002)。地下水による調査については、Ohsawa *et al.* (2002) のように炭素同位体を用いたマグマ成分の寄与の議論ばかりでなく、地下水中のヘリウム同位体比の分析結果からも上記の地域で高いマグマ性流体の寄与が報告されている。(Kita, 1993; Notsu, 2001; Morikawa, 2005)。本研究では、マグマ性の二酸化炭素の寄与の分布に、土壌ガスと地下水を用いた2通りの調査の間で違いが見られるのか、それぞれの結果と地質との関連性についての議論を行うために、特にマグマ性の二酸化炭素の寄与が高い地域において詳細な観測を行った結果を中心に解析を行った。

調査地域・試料・方法

土壌ガスの調査は、2001年9月から2004年11月までにおよそ240カ所で行った。各地点では、深さ30cmまで採気管を打ち込み、土壌ガスをシリンジで吸引し、ガルバニックセル型の酸素濃度計により酸素濃度を、ガス検知管により二酸化炭素濃度を測定した。その後、ブチルゴムのセプタムの付いたバイアル瓶（10ml）、真空コックの付いたガラスボトル（100ml）かファームドチューブによりキャップされたアルミバック（3L）のいずれかに同位体測定用の試料を採取した。さらに可搬型のフラックスメーター（West System・Portable CO₂ flux meter）により二酸化炭素フラックスを測定した。採取したガス試料は、真空ラインにより二酸化炭素を分離して、デュアルインレット導入系を持つ質量分析計（MAT-252, Delta Plus）へ導入するか、ガスクロマトグラム分離を行う連続フロー型の質量分析計（Delta Plus with Gas Bench II）を用いて $\delta^{13}\text{C}$ を測定した（ $n=220$ ）。また、真空ラインにより二酸化炭素を分離した試料のいくつかについては、 ^{14}C 濃度を加速器質量分析計により測定した（ $n=44$ ）。

地下水調査は1999年10月から2004年11月までにおよそ300カ所で行った。調査時に水温、pH、電気伝導度を測定し、ガス透過の低いプラスチックボトルに同位体測定用の試料を採取した。採取した試料にリン酸を滴下して発生した二酸化炭素を上記と同様のシステムの質量分析計を用いて $\delta^{13}\text{C}$ を測定した（ $n=208$ ）。また、水質分析をイオンクロマトグラムにより行った。

土壌ガスや地下水中の炭素成分に占めるマグマ性炭素の寄与は、同位体マスバランスを利用して計算した。土壌ガスについては、マグマ成分の他に大気と生物起源の炭素を考慮した手法（Takahashi et al., 2004a）を用いた。地下水試料については、マグマ成分の他に生物起源の炭素を考慮した手法（Ohsawa et al., 2002）を用いた。

これらの手法でマグマ性の二酸化炭素の寄与を計算するためには、端成分ごとの炭素同位体組成や二酸化炭素の濃度を仮定する必要がある。大気成分については、Levin and Kromer (1997)により報告されている大気中の二酸化炭素観測結果を利用して算出している。大気成分の数値は年々の観測ごとに違った値を用いた。マグマ成分では $\delta^{14}\text{C}$ を -1000‰ としている。 $\delta^{13}\text{C}$ については土壌ガスと地下水のそれぞれで異なった値を用いた。土壌ガスでは、雲仙・清七地獄の土壌中の二酸化炭素の値を採用した（ -3.8‰ ）。地下水では島原地域の中で最も高い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示すものを端成分として用いた（ -1.5‰ ）。生物起源の二酸化炭素の $\delta^{14}\text{C}$ は、そのときの大気中の二酸化炭素の $\Delta^{14}\text{C}$ と同一であると仮定して算出した。 $\delta^{13}\text{C}$ については、 ^{14}C 測定を行った試料について、 ^{14}C - ^{13}C 、 ^{14}C -濃度、 ^{13}C -濃度のそれぞれのマスバランスで求めたマグマ成分の寄与率の違いが最小になるように設定した（ -26‰ ）。地下水試料では十分な ^{14}C の測定数が得られていないため、上記のような推定は行わず、 -20‰ と仮定した。

結果・考察

図1に土壌ガス試料について、図2に地下水試料の観測結果を示す。土壌ガスと地下水のそれぞれで得たマグマ性の二酸化炭素の寄与の空間分布は非常に類似した傾向を示した。この傾向は、マグマ成分の寄与が高い地点が断層や断層を延長したライン上に集中していることで特徴づけられる。また、Takahashi et al. (2004b) では、断層の直上と思われる地点で土壌ガス中の二酸化炭素の濃度と $\delta^{13}\text{C}$ の上昇を報告している。本研究の結果も、いくつかの断層はマグマ性流体の通り道となっていることが示唆されている。

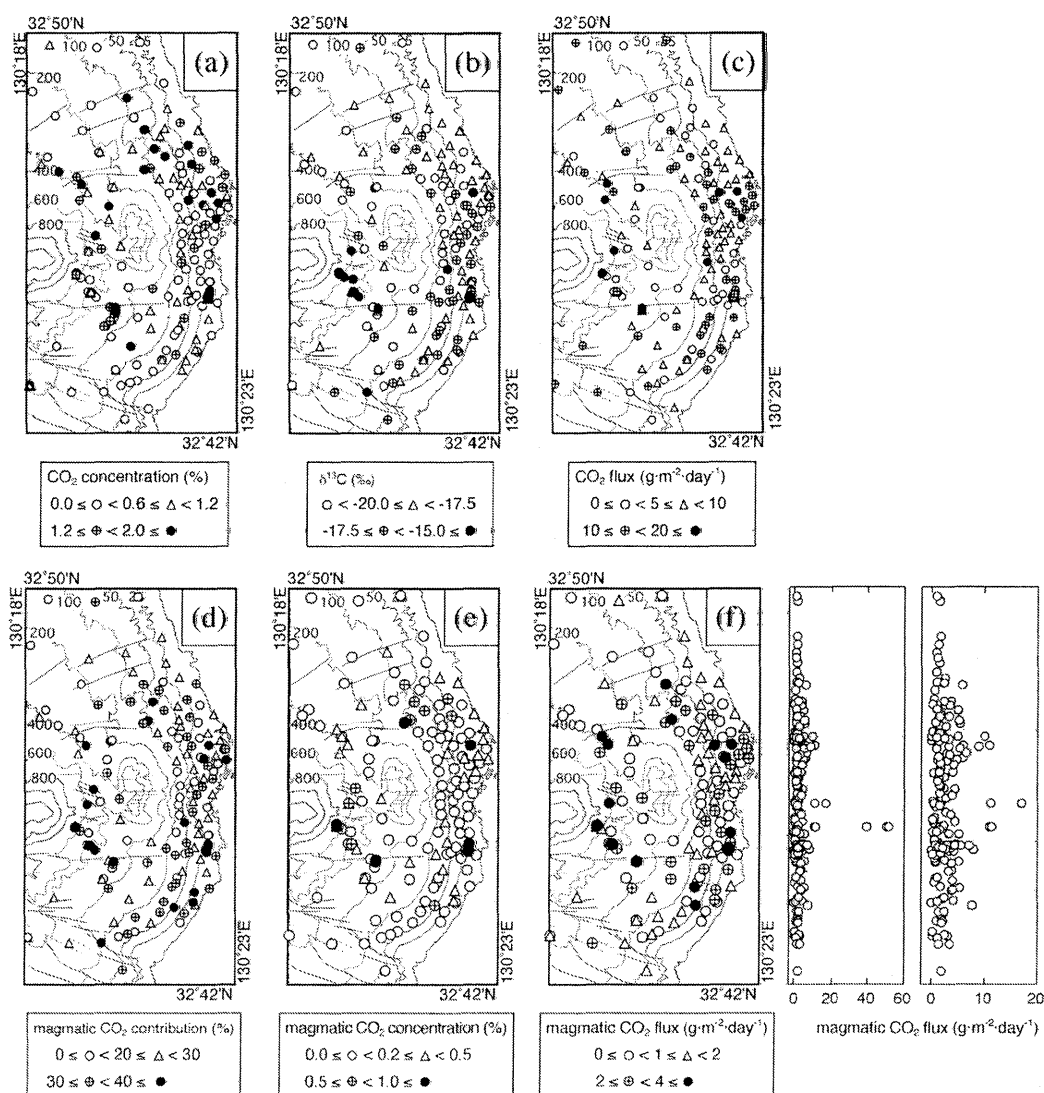


Fig. 1 Spatial variations of CO₂ concentration (a), $\delta^{13}\text{C}$ (b), CO₂ flux (c), magmatic CO₂ contribution (d), magmatic CO₂ concentration (e) and magmatic CO₂ flux (f) at the east region of graben obtained by soil air survey. The plots objected on N-S line show the high magmatic CO₂ flux was observed along the faults zone (f). The solid and dotted lines are shown faults and lineaments, respectively (after Hoshizumi et al., 2002)

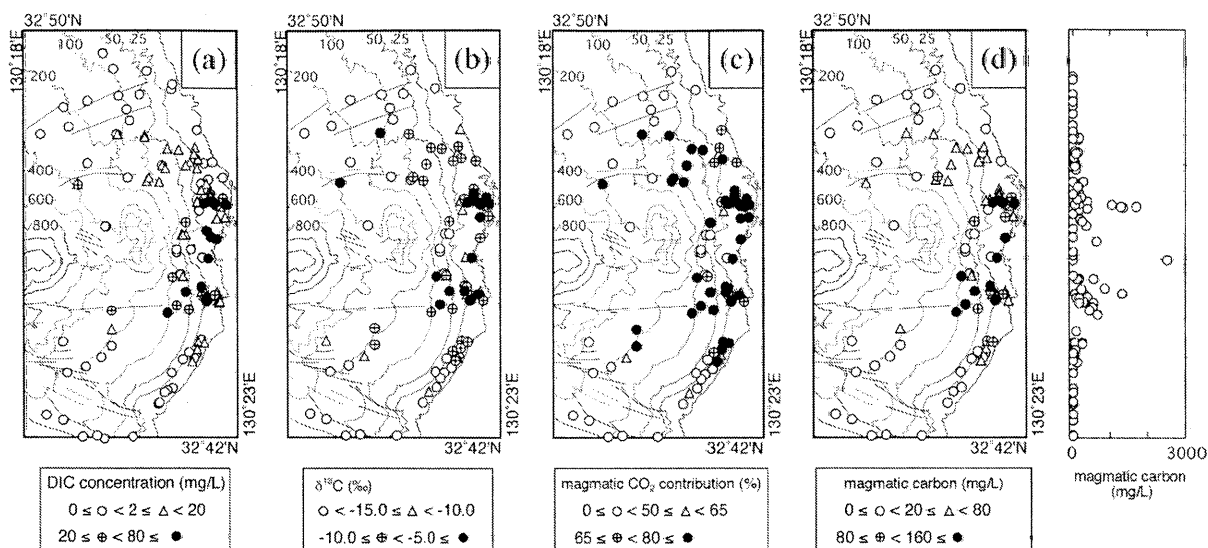


Fig. 2 Spatial variations of DIC concentration (a), $\delta^{13}\text{C}$ (b), magmatic carbon contribution (c), magmatic carbon concentration (d) at the east region of graben obtained by groundwater survey. The plots objected on N-S line show the high magmatic carbon was observed along the faults zone (d). The soild and dotted lines are shown faults and lineaments, respectively (after Hoshizumi et al., 2002)

土壌ガスと地下水を用いた調査で、マグマ成分の寄与の空間分布が類似した傾向を示したことは、マグマ性の二酸化炭素は地下水に溶け込んで運ばれてきたと言うよりも、それぞれの地点の近傍で地下から上昇してきて、一部は地下水へ溶け込み、一部は土壌ガスを通じて大気へ放出されたと考えることができ、マグマ性の二酸化炭素の上昇の程度は場所ごとに異なることがわかる。ここで問題となるのは、上昇してきたマグマ性の二酸化炭素の $\delta^{13}\text{C}$ と地下水へ溶け込んだ成分の $\delta^{13}\text{C}$ 、土壌ガスを通じて放出された成分の $\delta^{13}\text{C}$ のそれぞれが同位体分別の影響を受けて変化している可能性があることである。もしそうだとすれば、土壌ガスと地下水の間での炭素の分配が調査地点ごとに同一であるとは考えにくく、調査地点間で $\delta^{13}\text{C}$ の変化が異なり、マグマ成分の寄与の見積もりに誤差を生じさせる原因のひとつになってしまう。現段階では、この本題についての解析が進んでいないが、今後の課題としたい。また、土壌ガスと地下水の2つの調査結果は異なる単位で表現されているため、直接の数値の比較ができない。この問題についても、二酸化炭素のフラックスを求めるための解析を行って解決していきたい。

謝辞

本研究の ^{14}C 測定は、独立行政法人産業技術総合研究所より年代測定総合研究センターへ

の委託研究（課題名：異なる地質環境での炭素試料の高精度の ^{14}C 分析に関する研究）により行われた。

引用文献

- Farrar, C. D., Sorey, M. L., Evans, W. C., Howle, J. F., Kerr, B. D., Kennedy, B. M., King, C. -Y. and Southon, J. R. (1995) Forest-killing diffuse CO_2 emission at Moomoth Mountain as a sign of magmatic unrest. *Nature*, **376**, 675–678.
- Hernández, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M., Pérez, N. M. (2001) Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, **292**, 83–86.
- 星住英夫・宇都浩三・松本哲一・徐勝・栗原新・角井朝昭（2002）雲仙火山の形成史—山麓掘削と組織的放射年代測定の結果— 月刊「地球」, **24**, 828–834
- Kita, I., Nagao, K., Taguchi, S., Nitta, K. and Hasegawa, H. (1993) Emission of magmatic He with different $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios from the Unzen volcanic area, Japan. *Geochem. Jour.*, **27**, 251–259.
- Levin, I. and Kromer, B. (1997) Twenty years of atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ observations at Schauinsland station, Germany. *Radiocarbon*, **39**, 205–218.
- Morikawa, N., Kazahaya, K., Takahashi, H. A., Inamura, A., Ohwada, M., Yasuhara, M., Fourre, E., LeGuern, F. and Jean-Baptiste, P. (2005) Detailed spatial distribution of helium in groundwaters around Unzen volcano. Extended abstract of Unzen workshop 2005, 73–74.
- Notsu, K., Nakai, S., Igarashi, G., Ishibashi, J., Mori, T., Suzuki, M. and Wakita, H. (2001) Spatial distribution and temporal variation of $3\text{He}/4\text{He}$ in hot spring gas released from Unzen volcanic area, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **111**, 89–98.
- Ohsawa, S., Kazahaya, K., Yasuhara, M., Kono, T., Kitaoka, K., Yusa, Y. and Yamaguchi, K. (2002) Escape of volcanic gas into shallow groundwater systems at Unzen Volcano (Japan): evidence from chemical and stable carbon isotope compositions of dissolved inorganic carbon. *Limnology*, **3**, 169–173.
- 高橋浩・風早康平・篠原宏志・森川徳敏・中村俊夫。（2003）雲仙火山周辺における土壌中の二酸化炭素に対する火山性流体の影響マッピング
- Takahashi, H. A., Kazahaya, K., Shinohara, H. and Nakamura, T. (2004a) Application of radiocarbon to detect a deep source CO_2 in soil air. *NIMB*, **223–224**, 483–488.
- Takahashi, H. A., Kazahaya, K., Shinohara, H. and Nakamura, T. (2004b) Pathways for escape of magmatic carbon dioxide to soil air at Unzen volcano, SW Japan. *Radiocarbon*, **46**, 491–496.

Spatial variation of magmatic carbon dioxide in soil gas and groundwater of Unzen volcano, SW Japan

*Hiroshi A. Takahashi, Kohei Kazahaya, Hiroshi Shinohara, Noritoshi Morikawa,

Masaya Yasuhara, Akihiko Inamura, Michiko Ohwada

(Geological Survey of Japan, AIST)

and

Toshio Nakamura (CCR, Nagoya University)

Abstract

Unzen volcano is located on the western part of Beppu-Shimabara graben in Shimabara Peninsula, Kyushu Island, SW Japan. To obtain magmatic CO₂ distribution of volcanic body in Shimabara Peninsula, we carried out both the soil gas and groundwater surveys. Magmatic carbon contribution in soil air and groundwater is estimated using carbon isotope ratios. Here, we compare the spatial variations of magmatic CO₂ flux from soil gas and magmatic carbon concentration in groundwater, and discuss process of CO₂ degassing through volcanic body.

Soil gas sample was taken at the depth of 30cm in soil for measurements of CO₂ concentration and carbon isotope. CO₂ flux was measured by a portable CO₂ flux meter (WEST System). Groundwater sample have been collected from springs and wells. The $\delta^{13}\text{C}$ of soil gas and DIC were measured by CF-IRMS system (Thermo Electron), and some samples were used for ¹⁴C measurement by the AMS system.

The higher magmatic contribution is shown in the eastern region of Unzen graben both in soil gas and groundwater. The spatial distribution of magmatic CO₂ flux through soil gas in the eastern area shows a good agreement with magmatic carbon concentration in groundwater. The high magmatic contribution is found along the fault or lineament. This suggests that magmatic fluid is upwelling along the fracture zone developed as fault system of Unzen graben.

* Phone: +81-29-861-2486, Fax: +81-29-861-3775, e-mail: h.a.takahashi@aist.go.jp

研究発表等（平成 15 年度）

<誌上発表>

Takahashi, H. A., Kazahaya, K., Shinohara, H. and Nakamura, T. (2004) Application of radiocarbon to detect a deep source CO₂ in soil air. *NIMB*, 223–224, 483–488.

Takahashi, H. A. Kazahaya, K., Shinohara, H. and Nakamura, T. (2004) Pathways for escape of magmatic carbon dioxide to soil air at Unzen volcano, SW Japan. *Radiocarbon*, 46, 491–496.

<学会発表>

Takahashi, H. A., Yasuhara, M., Tsukamoto, H., Kazahaya, K., Inamura, A., Morikawa, N., Takahashi, M., Nakamura, T., Nagao, K. and Sumino, H. "Groundwater study using drill holes in the Abukuma granitic province, NE Japan: the multi-isotopic approach to evaluate crack water stability" AGU Fall meeting, San Francisco, USA, December, 2004.

Takahashi, H. A., Kazahaya, K., Shinohara, H., Morikawa, N., Yasuhara, M., Inamura, A., Ohwada, M. and Nakamura, T. "CO₂ Degassing through Volcanic Body of Unzen Volcano" Unzen International workshop, Shimabara, February, 2005

高橋 浩・塚本 斉・風早康平・稲村明彦・森川徳敏・安原正也・高橋正明・中村俊夫・太田友子・丹生越子・長尾敬介・角野浩史「阿武隈花こう岩地域におけるボーリングによる地下水調査（２）：裂罅系の地下水へのマルチアイソトープによるアプローチ」 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会，幕張メッセ国際会議場，2004 年 5 月