

短 報

海洋地域の沈み込み帯から放出される
低 N_2/He 比のマグマ性ガス
—伊豆-マリアナ弧の小笠原硫黄島について—

京都大学理学部附属地球熱学研究施設

大 沢 信 二, 由 佐 悠 紀
大 上 和 敏, 北 岡 豪 一

(平成9年11月29日受付, 平成10年3月8日受理)

Low N_2/He Ratio Magmatic Gas Discharged from
Ogasawara-Iwojima in Izu-Mariana Arc along an Oceanic
Subduction Zone between Pacific and Philippine-Sea Plates

Shinji OHSAWA, Yuki YUSA, Kazutoshi OUE and Koichi KITAOKA

Laboratory for Volcanology and Geothermal Sciences
(Beppu Geothermal Research Laboratory), Faculty of Sciences, Kyoto University

Abstract

Fumarolic gas samples were collected from Ogasawara-Iwojima Island on the Izu-Mariana arc, which is located along a convergent margin between Pacific and Philippine-sea plates. Along the margin, the Pacific plate putting on thick oceanic sediments subducts beneath the Philippine-sea plate, on which accretionary prism (sedimentary basement and/or metamorphic rocks originated from sedimentary rock) is not well-developed. Trends of inert gas compositions ($He-Ar-N_2$) indicate that N_2/He ratio of magmatic gas ascending to the Ogasawara-Iwojima Island from deep is nearly 20, which is considerably lower than the lowest value (170) observed in the Japanese main-land and is in the same order of the mantle value (10). These characteristics strongly support the new model proposed by Ohsawa et al. (1997), in which N_2 -poor magmatic gas ascending from mantle along subduction-zone is given N_2 as contaminant from basement rocks containing nitrogen compounds. Variety of N_2 contents (N_2/He ratios) of magmatic gases in subduction-zones is not resulted from difference of physical and chemical states of subducting plates, but will be reflection of geochemical heterogeneity of crust.

Key Words : Ogasawara-Iwojima, Fumarolic gas, Inert gas, Magmatic gas, Subduction zone, Crust, Basement rocks, Nitrogen compounds

キーワード : 小笠原硫黄島, 噴気ガス, 不活性ガス, マグマ性ガス, 沈み込み帯, 地殻, 基盤岩, 窒素化合物

沈み込み帯の火山・地熱地帯を通して地球内部から放出されるマグマ性ガスの窒素の起源については、古くから国内外の研究者の注目を集め、現在も活発に研究が進められているが、ほとんどの研究が沈み込み帯の海洋性堆積物の熱分解生成物に起源を求めたMatsuo et al.¹⁾を範例としており、それが議論の前提となっている。例えば、Kita et al.²⁾は、東北日本と西南日本の火山・地熱地域から放出されるマグマ性ガスのHe/Ar比が同様な値を示すにもかかわらず、東北日本のN₂/Ar比が4250であるのに対して西南日本のそれは424と著しく低い理由を、日本列島下へ沈み込みプレート(太平洋プレートとフィリピン海プレート)の物理・化学的状態の違いによるものと考えている。

一方、我々は、最近進歩の著しい付加体地質学の研究成果³⁾に注目し、九州地方の火山・地熱地域(別府・九重・阿蘇・雲仙・霧島)で採取した噴気ガスの不活性ガス組成(N₂-He-Ar組成)と基盤地質との関係を検討した結果、「マグマ性ガス中のN₂は、プレートの沈み込みにもなって地球内部に引きずり込まれた海洋性堆積物に由来するのではなく、先第三紀の基盤岩(堆積岩や堆積岩起源の変成岩)中に存在する窒素化合物を起源とする」という新たな見解にたどり着いた⁴⁾。そして、この考えの妥当性の検討には、厚い大陸地殻の存在しない沈み込み帯に位置する火山・地熱地域に噴出するマグマ性ガスの不活性ガス組成を、先第三紀の基盤岩の有無に着目して実測ないし推定するのが適当であろうことを示した⁴⁾。

日本列島周辺において厚い大陸地殻の存在しない沈み込み帯としては、伊豆-マリアナ弧(この火山弧はさらに伊豆・小笠原弧、マリアナ弧のように細分されているが、本報告では一括してこのように呼ぶ)が知られている^{5, 6)}。そこでは、厚い海洋性堆積物を乗せた太平洋プレートが、大陸地殻の発達していないフィリピン海プレートに沈み込んでいる。この火山弧下の地殻には、反射法地震探査の結果⁷⁾から、P波伝搬速度6km/secのいわゆる花崗岩層は存在しないと推定されているので、この地域の地殻はマフィックな火成岩やそれを起源とする変成岩からなる典型的な海洋地殻であると考えてよいであろう。海洋地殻の主要な構成岩石の一つである中央海嶺やホットスポットの海底玄武岩中の窒素濃度[0.9ppm~2.8ppm]⁸⁾は堆積岩や変成岩のそれ[ppmオーダーから数百ppm]⁹⁾に比べ低いので、上述の我々の考えに従えば、この火山弧内の火山・地熱地域に噴出するマグマ性ガスの窒素濃度(N₂/He比)は、日本本土の火山・地熱地域のものよりかなり低いと予想される。このような海洋地域に位置する火山弧の火山・地熱地域から放出される噴気ガスの採取と分析(不活性ガス組成)は、沈み込み帯のマグマ性ガス中のN₂の起源に関する議論をさらに推し進める上で、有効かつ効果的な手段であると考えられる。

伊豆-マリアナ弧内で定常的な噴気活動が認められる島としては、小笠原硫黄島が有名である。硫黄島は、東京の南約1300kmに位置する面積およそ22km²の火山島である。島の主要な部分は粗面安山岩質の溶岩と火砕岩(現地では土丹岩と呼ばれる)から構成されるが、一部に未固結の砂礫層が分布する¹⁰⁾。全島が地熱地帯となっており、地中から大気中へ放出される熱量は、毎秒平均1×10⁸カロリー(420MW)と推定されている¹¹⁾。いたるところに噴気孔と温泉が展開し、水蒸気爆発や熱泥水噴出タイプの火山活動も記録されている。火山活動と関連したその他の顕著な現象は、平均11cm/年以上という異常な隆起活動であり、このような隆起活動により多数の海成段丘(23段)が全島を通じて発達しており¹²⁾、標高100mを越える場所のあちらこちらでサンゴの遺骸が見られる。硫黄島における地球化学的研究は小坂ら¹³⁾により精力的に行われているが、本研究で必要とする不活性ガス成分(He, Ar, N₂)の内、Arのデータが得られていない。我々は、大沢ほか⁴⁾により提案された、沈み込み帯のマグマ性ガス中のN₂の起源に関するモデルの検証を目的とし、不活性ガス組成を網羅する噴気データを取得するために、1997年6月27日から7月2日の6日間小笠原硫黄島に滞在した。

化学分析に供した試料は、自然の噴気孔から放出されている噴気ガスを、アルカリ溶液(5M-KOH)を含む2口注射器に採取したものである。噴気孔には2重のパイプを挿入し、噴気ガスを内管と外管の間にも流して内管中を流れるガスを保温し、これを採取した。噴気孔の径がパイプ径より小さかったり、ガスがスチーミンググラウンド様の噴出を行っている場合は、パイプの先端にロートを取り付け、ロートの部分を噴気孔にあてがい、その周縁を土封してパイプの他端から噴出するものを採取した。試料は、実験室に持ち帰り、前報⁴⁾と同じ方法で分析した。なお、噴気ガスのSO₂/H₂S比は、SO₂用およびH₂S用の北川式ガス検知管を直列に接続して、現地で測定した。試料採取場所を、Fig. 1に示す(■1~■9：採取場所の名称はTable 1を参照)。

分析結果を、Table 1に示す。Table 1のデータと、大沢ほかにより公表された九州本土の火山・地熱地域で採取された噴気ガスの化学分析データ^{4, 14)}を、He-N₂-Arダイアグラム上にプロ

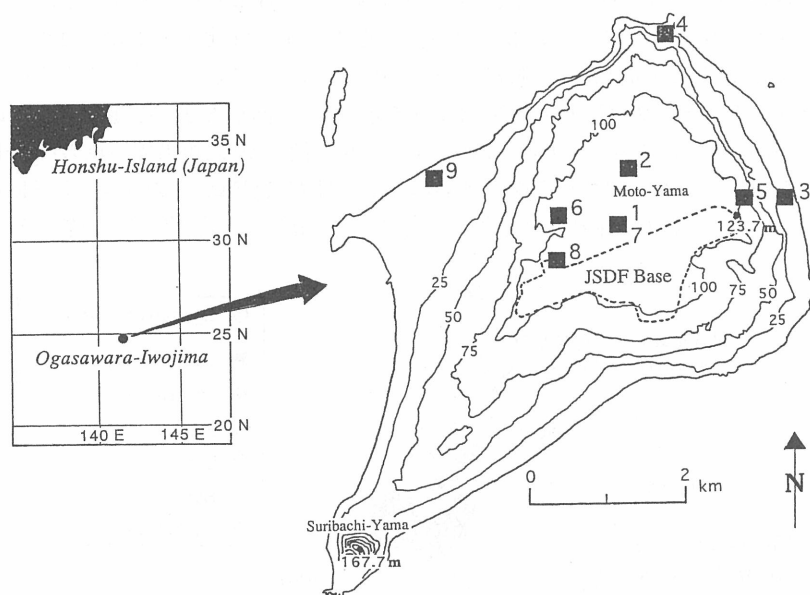


Fig. 1 Map showing location of the Ogasawara-Iwojima Island (●) and sampling sites for chemical analyses of fumarolic gases in the island (■1~■9)

図1 小笠原硫黄島の位置図と噴気ガス試料の採取場所

Table 1 Chemical data of fumarolic gases discharged from Ogasawara-Iwojima

表1 小笠原硫黄島の噴気ガスの化学分析データ

No.	Sampling Location	Sampling Date	Temp. (°C)	SO ₂ /H ₂ S	CO ₂ ΣS		He	H ₂	Ar	N ₂	CH ₄
					(mmol/mol H ₂ O)						
OIJ-1	Motoyama (Iwagaoka)-1	Jun. 28, 1997	98.7	<0.01	1.00	0.136	0.00102	7.58	0.0477	3.38	0.00617
OIJ-2	Site of North airport	Jun. 28, 1997	98.7	<0.01	0.533	0.0424	<0.0003	5.11	0.0691	6.73	<0.005
OIJ-3	Kongo-iwa	Jun. 28, 1997	98.9	<0.01	4.27	0.0977	0.00646	3.15	0.108	9.02	0.00660
OIJ-4	Kitano-hana-jigoku	Jun. 29, 1997	96.3	<0.01	84.1	1.76	0.332	218	0.661	48.0	0.306
OIJ-5	West of Kongo-iwa	Jun. 29, 1997	98.8	<0.01	3.93	0.0853	0.00880	2.89	0.0801	8.06	0.0127
OIJ-6	Megane-iwa	Jun. 29, 1997	98.4	<0.01	14.9	0.00374	0.0429	54.5	0.262	16.8	0.519
OIJ-7	Motoyama (Iwagaoka)-2	Jun. 30, 1997	98.9	<0.01	1.46	0.181	0.00144	4.53	0.0526	4.54	0.00526
OIJ-8	East of US refueling station	Jun. 30, 1997	98.7	<0.01	9.24	0.0377	0.0190	30.4	0.389	31.9	0.0416
OIJ-9	Idogahama	Jun. 30, 1997	99.1	<0.01	1.67	0.176	0.00181	6.56	0.109	8.06	0.0135

ットしたのが、Fig. 2である。この三角図上に示された中部九州を除く日本列島のマグマ性ガス (Magmatic gas of Japan excluding Central Kyushu : ◆印) の値は、Kiyosu¹⁵⁾ により推定された東北日本のものであるが、西南日本に存在する霧島火山群から放出されるガス (Fig. 2 中の◇印)¹⁴⁾ もその範囲にあるため、日本列島にあって中部九州のみが例外的であると考え、上述のような表現をとった。なお、中部九州のマグマ性ガス (Magmatic gas of Central Kyushu : ★印) は、雲仙普賢岳山頂部の普賢池付近で平林ほか¹⁶⁾ により得られたものであり、そのHe/Ar比(2)が世界各地のマグマ性ガスに共通した値(1~6)¹⁷⁾ の範囲内にあることから、筆者らがマグマ性であると判断したものである。マントル(Mantle)の値はGiggenbachの論文¹⁸⁾ から引用したもので、ホットスポット地域や中央海嶺域で採取されたガスにより推定されたものである(彼の論文では「Basaltic mantle」という表現が用いられている)。

今回の現地調査では、He/Ar比が1以上のマグマ性ガスは採取することができなかった。しかし、いくぶんかの天水成分を含んでいるものの比較的高いHe/Ar比を示す試料は得ることができ〔北の鼻地獄(Kitano-hana-jigoku)や眼鏡岩(Megane-iwa)〕、これらのデータから硫黄島の地下深部から供給されているマグマ性ガスのN₂/He比を前報⁴⁾ と同じ方法で推定できる。即ち、噴気ガスのデータ(◎印)を結ぶ直線上でHe/Ar比がマントルの値(2.9)に相当する点のN₂/He比として求める。このようにして推定した小笠原硫黄島のマグマ性ガス (Fig. 2 のA) のN₂/He比はおおよそ23であり、中部九州のマグマ性ガスやそれらを除く日本列島のマグマ性ガスの値(それぞれ170,

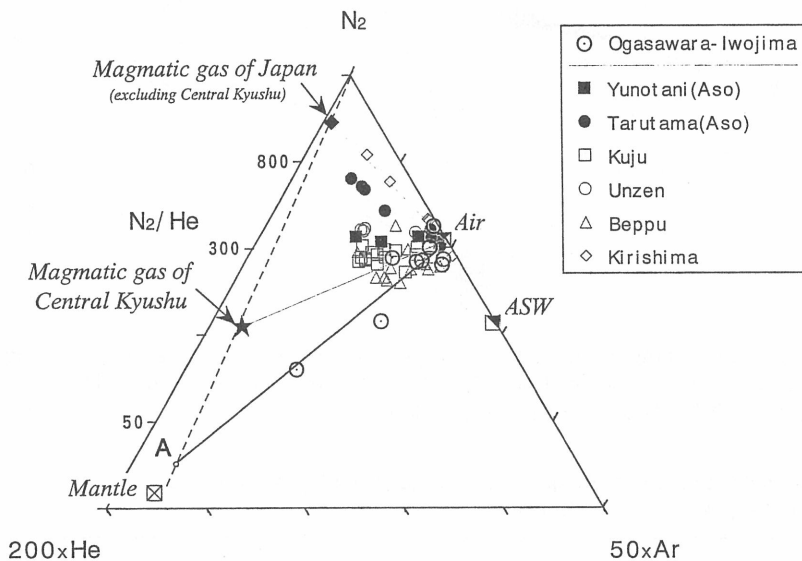


Fig. 2 Relative He, Ar and N₂ contents of fumarolic gases from the Ogasawara-Iwojima Island. Data of fumarolic gases from Kyushu Island, Japan are also plotted on the diagram. The solid rhombus indicates magmatic gas of Japan excluding Central Kyushu interpreted from the estimated value by Kiyosu (1986) and the solid asterisk shows magmatic gas of Central Kyushu inferred from Mt. Unzen Fugen-dake collected by Hirabayashi et al. (1993). The small open circle attaching A represents estimated magmatic gas from the Ogasawara-Iwojima Island (for the estimation, see in the text). The thick and thin solid lines show mixing lines between the magmatic gases and air. Magmatic gases in the whole world will be on the broken line. ASW means Air-saturated water.

図2 小笠原硫黄島の噴気ガスのHe-Ar-N₂組成

2000)に比べて桁違いに低く、マントル起源ガスの N_2/He 比(10)と同じオーダーであることが分かる。

以上のように、小笠原硫黄島における N_2 に乏しい(低 N_2/He 比)マグマ性ガスの放出は予期していた通りの結果であり、これは「沈み込み帯のマグマ性ガス中の N_2 の大半は先第三紀の基盤岩(堆積岩や堆積岩起源の変成岩)中の窒素化合物に由来する」という我々の見解を支持する有力な証拠であると考えられる。今後さらに同様な証拠固めを行っていく必要はあるが、ここでは新たに生じた解決すべき問題について述べておきたい。

今回の研究対象となった沈み込み帯では、海溝(伊豆-小笠原海溝やマリアナ海溝)深度はおよそ1万メートルにも達し、そこには多量の堆積物が溜まっていない。さらに、火山弧(伊豆-マリアナ弧)には厚い付加帯が発達していないことを合わせ考えると、プレート(太平洋プレート)上に乗った海洋性堆積物は確実にマントル内に引きずり込まれていることになる。それにもかかわらず火山・地熱活動にともなって噴出するマグマ性ガスが N_2 に乏しいのは、一見逆説的に思える。即ち、地球内部に引きずり込まれた海洋性堆積物中の窒素の行方を明らかにする必要があり、その説明としては、イ)プレートとともにマントル内に沈み込んだ海洋性堆積物の脱水分解反応¹⁹⁾で堆積物中の窒素は流体相に移行せず、反応残留物中に固定されて背弧側のマントル深部に持ち込まれているとするか、あるいは、ロ)沈み込む海洋性堆積物中の窒素は、堆積物の圧密過程で放出される水を主体とする流体に含まれて海溝側に戻されている、とすることが挙げられる。世界各地の沈み込み帯のプレート境界部で多くの海底湧水が実測ないし推定されていること^{20~22)}と、その湧水中に多量の NH_4^+ が検出されている(例えば、相模トラフでは湧水1 kg中に数千 μ molが含まれる)こと²³⁾から、現時点ではロ)が無理のない説明であると考えているが、この解釈の妥当性を支持する証拠を今後収集していかなくてはならない。

謝 辞

今回の調査は、海上自衛隊と航空自衛隊の全面的な協力の下に行われた。特に、円滑な調査と快適な滞在に深く配慮された、海上自衛隊硫黄島航空基地隊司令平田辰雄1等海佐、海上自衛隊海上幕僚監部運用課運用第1班の堀井 博2等海佐、同じく山田洋士3等海佐、海上自衛隊硫黄島航空基地隊気象班長の首藤重光1尉、同じく分隊士の松尾勇治2尉と藤井幹彦2尉、そして調査に同行され試料採取に協力された海上自衛隊硫黄島航空基地隊気象班の諸氏に、厚く御礼申し上げます。海上自衛隊対潜資料隊海洋情報専門官の千々木雅也氏は、自衛隊側の窓口となられ調査の実現に向けて尽力された上に現地にも同行された。また、防衛大学の関岡 満名誉教授は、今回の調査実現のきっかけを与えて下さった。ご両名に対して、深く感謝の意を表します。

なお、本論文を改善するにあたり、2名の匿名査読者からは建設的な意見をいただいた。また、本研究に要した費用の一部に、文部省科学研究費(基盤研究(B)(2)研究代表者:由佐悠紀、課題番号:08454132)を当てた。記して謝意を表する。

文 献

- 1) Matsuo, S., Suzuki, M. and Mizutani, Y.: Terrestrial Rare Gases (Alexander, E.C. Jr. and Ozima, M. eds.), Japan Science Society Press, 17-25, 1978.
- 2) Kita, I., Nitta, K., Nagao, K., Taguchi, S. and Koga, A.: *Geology*, 21, 391-394, 1993.

- 3) 平 朝彦：日本列島の誕生, 226p, 岩波書店, 東京, 1990.
- 4) 大沢信二, 由佐悠紀, 大上和敏, 北岡豪一：温泉科学, **47**, 56-67, 1997.
- 5) 瀬野徹三：プレートテクトニクスの基礎, 190p, 朝倉書店, 東京, 1995.
- 6) 平 朝彦, 芦寿一郎：月刊海洋, **21**, 57-63, 1989.
- 7) 村内必典：地学雑誌, **94**, 418-424, 1985.
- 8) 酒井 均, 松久幸敬：安定同位体地球化学, 東京大学出版会, 東京, 315-346, 1996.
- 9) 市原優子：地質学雑誌, **98**, 885-899, 1992.
- 10) 大八木規夫, 井口 隆：地学雑誌, **94**, 34-43, 1985.
- 11) 江原幸雄：地学雑誌, **94**, 114-125, 1985.
- 12) 熊谷貞治, 高橋 博：地学雑誌, **94**, 77-85, 1985.
- 13) 小坂丈予, 小沢竹二郎, 松尾禎士, 平林順一, 大隈多加志：地学雑誌, **94**, 149-161, 1985.
- 14) 大沢信二, 由佐悠紀, 北岡豪一：温泉科学, **45**, 290-294, 1995.
- 15) Kiyosu, Y. : *Geochemical Journal*, **19**, 275-281, 1986.
- 16) 平林順一, 大場 武, 吉田 稔, 野上健治, 内川 啓, 小坂丈予, 野津憲治, 鍵山恒臣：雲仙岳溶岩流出の予知に関する研究, 平成3年度科学研究費補助金・総合研究(A)研究成果報告書, 99-111, 1993.
- 17) Mazor, E. : *Geothermics*, **5**, 21-36, 1977.
- 18) Giggenbach, W.F. : *Proc. Water-Rock Interaction*, **7**, 873-878, 1992.
- 19) 巽 好幸：沈み込み帯のマグマ学, 186p, 東京大学出版会, 東京, 1995.
- 20) 丸井敦尚：日本水文科学会誌, **27**, 85-94, 1997.
- 21) Church, T.M. : *Nature*, **380**, 579-580, 1996.
- 22) Moore, W.S. : *Nature*, **380**, 612-614, 1996.
- 23) Tsunogai, U., Ishibashi, J., Wakita, H., Gamo, T., Masuzawa, T., Nakatsuka, T., Nojiri, Y. and Nakamura, T. : *Earth Planet. Sci. Lett.*, **138**, 157-168, 1996.