

---

原 著

---

## 阿蘇火山地域から放出される 噴気ガスの不活性ガス組成

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5月12日受付, 平成9年8月2日受理)

### Inert Gas Compositions of Fumarolic Gases Discharged from the Aso Volcanic-geothermal Region, Japan

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 two active geothermal fields, Yunotani and Tarutama, which are located at the west part of central cones of Aso volcano, Japan; Tarutama is sited at about 2km south of Yunotani. Inert gas compositions (He-Ar-N<sub>2</sub>) of the Yunotani fumarolic gases are similar to those of volcanic and geothermal gases in the Beppu-Shimabara graben (Beppu, Kuju and Unzen), whereas the Tarutama fumarolic gases are quite rich in N<sub>2</sub> compared with formers. Trends of inert gas compositions indicate that N<sub>2</sub>/He ratios of magmatic gases ascending to the Yunotani and Tarutama areas from deep are nearly 340 and about 1000, respectively. These characteristics are difficult to be explained by the prevalent model in which N<sub>2</sub> in magmatic gas is derived from oceanic sediments with plate-subduction. This paper will propose a new model, in which N<sub>2</sub>-poor magmatic gas ascending from mantle is given N<sub>2</sub> as contaminant from basement rocks containing nitrogen compounds. This model explains that the Tarutama gas has been contaminated by sedimentary rocks (N-rich), and the Yunotani gas by metamorphic rocks and/or granite (N-relatively poor). In fact, the drillings in this region show that the basements are granite in the northern part and sedimentary in the southern part. The inert gas compositions of fumarolic gases from other volcanic-geothermal regions in Kyushu Island (Beppu, Kuju, Unzen and Kirishima) can be also explained by this model.

Key words : Aso Volcano, Fumarolic gas, Inert gas, Magmatic gas, Basement rocks, Nitrogen compounds

キーワード : 阿蘇火山, 噴気ガス, 不活性ガス, マグマ性ガス, 基盤岩, 窒素化合物

## 1. はじめに

日本最大のカルデラとして知られている阿蘇カルデラ(直径:東西18km・南北25km,面積:380km<sup>2</sup>)は、約30万年前から7万年前にかけて起こった阿蘇火砕流を流出した大規模な火山活動で形成された。カルデラ内にはおよそ15の中央火口丘が存在し、それらは玄武岩から流紋岩まで多種多様な岩石から構成され、後カルデラ火山活動により形成された。それら中央火口丘群に属する中岳は、現在も活動中の火山であり、ストロンボリ式の噴火を繰り返し、大量の火山弾・スコリア・火山灰を噴出している<sup>1)</sup>。

阿蘇火山の噴気地帯は、カルデラ内に点在し、上述の中岳第一火口、草千里ヶ浜西方2kmの湯の谷、夜峰山北麓の垂玉と地獄(両者には個別の地名が与えられているが至近距離にあるため一つの地域と見なし、本論では「垂玉」と一括してよぶことにする)の3ヶ所に存在する。中岳第一火口は最も活動的な地熱地帯であり、急峻な火口内壁の数ヶ所から二酸化硫黄臭のする火山ガスを多量に放出している。火山活動が活発なときには、火口底の熱水(湯だまり)が干上がり、火口底にも多数の噴気孔が現れる。中岳から放出される噴気ガスの地球化学的研究は、小坂らにより精力的に行われ、主要成分に関する重要な知見が得られている<sup>2,3)</sup>が、不活性ガス組成に関する検討は十分にされていない。湯の谷の噴気地域に関しては、山崎らによる地球科学全般にわたる総合的な調査が行われている<sup>4)</sup>。その調査では噴気ガスの化学分析が行われているが、不活性ガスに関するデータは得られていない。垂玉の噴気ガスの化学・同位体組成については、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の報告書<sup>5)</sup>で参照することができるが、Arの化学分析値が高目に出ているように思われるため、再検討を要する。以上のように阿蘇火山の中央火口丘群から放出される噴気ガス、特にその不活性ガス組成に関する研究は十分に行なわれていない。

Kita et al.は、東北日本と西南日本の火山・地熱地帯から放出されるマグマ性ガスのHe/Ar比は同様な値を示すが、N<sub>2</sub>/Ar比は東北日本が4250であるのに対し、西南日本は424と著しく低いとした<sup>6)</sup>。そして、島弧の火山ガスのN<sub>2</sub>は海洋性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の熱分解生成物であるという推定結果<sup>7)</sup>を受け、前述のN<sub>2</sub>/Ar比の違いは、日本列島下へ沈み込むプレート(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した。その後、由佐らは、そのようなN<sub>2</sub>/Ar比の低いガスの噴出は別府-島原地溝帯に特有のものである可能性を示唆し<sup>8)</sup>、大沢らは西南日本火山帯に属する霧島火山群に噴出する噴気ガスを採取・分析して、そこに噴出するガスは東北日本火山帯と同様にN<sub>2</sub>/Ar比が高いことをつきとめ、由佐らの考えを支持した<sup>9)</sup>。後に公表されたOhba et al.の論文に見られる霧島火山地帯の噴気ガスのデータも、大沢らが発表したデータと同様の範囲にある<sup>10)</sup>。また、由佐らや大沢らの提示したものと同様の考えを、北もほぼ同じ時期に公表している<sup>11)</sup>。我々は、別府-島原地溝の南縁に位置する阿蘇火山に噴出する噴気ガスの不活性ガス組成(N<sub>2</sub>-Ar-He)がどのような値を示すかに興味をもち、試料を採取して分析したところ、カルデラ内の隣接する二つの噴気地帯において、地下深部から上昇してくるマグマ性ガスの不活性ガス組成に大きな違いが見らるというこれまでに経験しなかったユニークな結果を得たので報告する。また、本論では、そのデータが意味するところ(地殻深部の情報)についても若干の考察を行った。

## 2. 試料採取と化学分析

噴気孔や蒸気井の孔口に挿入したチタン製あるいはアルミ製パイプに導入された噴気ガスを、

アルカリ溶液(5M-KOH)を含む2口注射器に採取した。パイプ-注射器間及びパイプ-パイプ間をつなぐシリコン・チューブには、アスベスト・リボンを巻き付けパイプ中での水蒸気の凝縮を防ぎ、一方で注射器を水冷することにより注射器内への噴気ガスの流入を容易にした。噴気ガス放出の勢いが弱いときは、1) 2重管を噴気孔に挿入し、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、これを採取するか、2) 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。後者は、噴気孔に泥水が溜まって沸騰しているような場所で、泥水とともに噴出するガスを、泥水を分離しながら採取するのにも適しており(この場合は水封となる)、本研究でも利用した。噴気ガスは、Fig. 1に示した湯の谷地域(Yunotani area)と垂玉地域(Tarutama area)において、計10試料(湯の谷：3試料；垂玉地域：7試料)を採取した。なお、中岳第一火口内の噴気ガスは、この数年間では前述のように急峻な火口内壁や火口底にしか噴出しておらず、その採取は極めて危険であるために断念せざるを得なかった。

注射器に採取された噴気ガスは、次の方法により分析した。[1]  $H_2O$ は、試料採取前後の注射器の重量差より求めた。[2] アルカリ溶液に吸収されなかったガス( $He$ ,  $H_2$ ,  $Ar$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ )は、小型注射器に移して測容した後、大倉理研製AFG-555S型ガスクロマトグラフで分析した( $O_2$ キャリアー)。[3]  $CO_2$ は、アルカリ吸収液を $H_2O_2$ で酸化処理した後、検液を硫酸酸性にして $CO_2$ ガス電極(東亜電波製CE-235)で分析した。出力電位は、同社のIM-1B型イオンメータで記録した。[4]  $\Sigma S$ と $HCl$ については、 $H_2O_2$ で酸化処理したアルカリ吸収液をH形陽イオン交換樹脂に通して中和し、これを東亜電波製ノンサプレッサ型イオンクロマトグラフ(ICA-5000 SYSTEM)で分析した。なお、噴気ガスの $SO_2/H_2S$ 比は、 $SO_2$ および $H_2S$ 用ガス検知管(北川式)を直列に接続して、現地でも測定した。

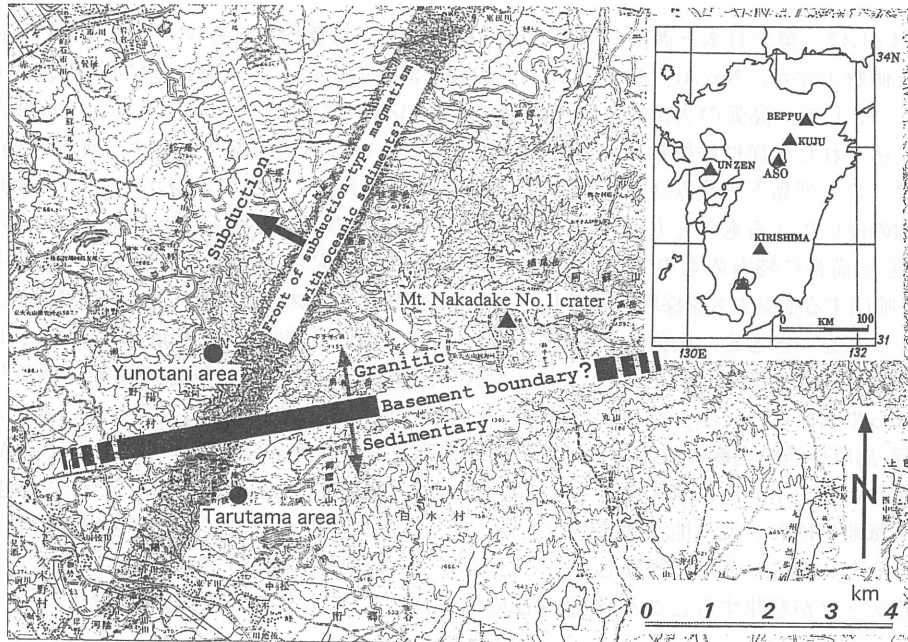


Fig. 1 Map showing the locations of the Yunotani and Tarutama geothermal fields in Aso volcano. For shaded zones, see in the text.

## 3. 分析結果

分析結果を、Table 1 に示す(Y-1, Y-3, Y-4, T-1~T-8). 本表には、比較のために今回新たに取得した、雲仙地獄(長崎県小浜町)と九重硫黄山・小松地獄・長者原(大分県九重町)の自然噴気や蒸気井から放出される噴気ガスの分析データも掲げてある(U-1~U-4, KJ-1~KJ-12, C-I~C-IV, A-I).

Table 1 のデータと大沢ほかにより公表された霧島火山地域および別府地熱地域の噴気ガスのデータ<sup>9)</sup>を、He-N<sub>2</sub>-Arダイアグラム<sup>12)</sup>上にプロットしたのが、Fig. 2 である. この三角図上に示された東北日本火山帯のマグマ性ガス(Magmatic gas of NE-Japan)の値は、Kiyosuの論文<sup>13)</sup>から引用した. また、別府-島原地溝内の雲仙普賢岳のマグマ性ガス(Magmatic gas of Fugen-dake)

Table 1 Chemical data of gas discharges from fumaroles etc. in the Aso, Unzen and Kuju volcanic regions

No.	Sampling Location	Sampling Date	Temp. (°C)	SO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub> ΣS HCl			He	H <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
					(mmol/mol H <sub>2</sub> O)							
Y-1	Aso-Kanko Hotel's well, Yunotani	Oct. 4, 1996	97.6	<0.01	21.2	0.205	0.001	0.148	99.0	3.77	373	39.2
Y-3	Mud pot A, Suzume-Jigoku, Yunotani	Oct. 4, 1996	94.3	<0.01	286	3.46	0.006	2.35	2410	18.1	2220	385
Y-4	Mud pot B, Suzume-Jigoku, Yunotani	Oct. 4, 1996	95.4	<0.01	234	3.52	0.005	1.28	522	5.68	924	181
T-1	Gas-released pipe, Tarutama	Oct. 5, 1996	96.6	<0.01	56.4	1.77	0.001	0.190	128	10.8	983	52.6
T-2	Fumarole A, Tarutama	Oct. 5, 1996	97.1	<0.01	45.5	1.41	0.002	0.190	5.73	13.6	1310	42.2
T-4	Boiling pool, Tarutama	Oct. 5, 1996	91.7	<0.01	368	9.98	0.004	0.517	263	39.4	3210	359
T-5	Fumarole B, Tarutama	Oct. 5, 1996	96.3	<0.01	56.1	1.79	0.001	0.181	202	1.85	288	45.2
T-6	Fumarole C, Tarutama	Nov. 13, 1996	97.3	NA	48.6	1.59	0.002	0.159	61.9	0.891	225	53.6
T-7	Fumarole D, Tarutama	Nov. 13, 1996	96.5	NA	62.1	2.08	0.0003	0.133	2.97	0.539	173	42.5
T-8	Fumarole E, Tarutama	Nov. 13, 1996	96.8	NA	46.0	1.44	0.002	0.113	91.4	0.702	164	40.5
U-1	Seishichi-Jigoku, Yukemuribashi, Unzen	Sept. 5, 1996	111.1	<0.01	33.4	0.717	0.005	0.482	76.8	2.57	405	271
U-2	Seishichi-Jigoku along Route 57, Unzen	Sept. 5, 1996	95.3	<0.01	81.8	2.14	0.003	1.23	120	29.1	3020	907
U-3	Oito-Jigoku, Unzen	Sept. 5, 1996	96.3	<0.01	24.4	0.704	0.001	0.410	37.7	2.27	365	206
U-4	Oito-Jigoku opposite, Unzen	Sept. 5, 1996	96.3	<0.01	39.2	0.942	0.001	0.495	6.09	5.66	659	303
KJ-1	Kuju-Iwo yama D-region	Aug. 8, 1995	94.9	<0.01	10.3	4.69	0.008	0.0879	4.12	0.426	54.1	1.60
KJ-2	Kuju-Iwo yama D-region	Aug. 8, 1995	95.7	<0.01	7.79	5.02	0.012	0.0926	4.77	0.421	53.0	1.92
KJ-3	Kuju-Iwo yama D-region	Aug. 8, 1995	96.4	0.19	5.05	2.84	0.012	0.0520	4.24	0.271	32.4	1.26
KJ-4	Kuju-Iwo yama B-region	Aug. 8, 1995	174.4	0.69	4.61	6.59	0.39	0.0594	4.05	0.356	43.3	1.05
KJ-5	Kuju-Iwo yama B-region	Aug. 8, 1995	95.9	<0.01	20.6	19.6	0.022	0.275	3.66	1.42	174	5.28
KJ-6	Kuju-Iwo yama B-region	Aug. 8, 1995	166.4	0.90	4.03	10.5	0.29	0.0634	37.9	0.416	47.5	1.20
KJ-7	Komatsu-Jigoku	Aug. 31, 1995	97.1	<0.01	3.39	0.21	0.009	0.0082	2.62	0.259	22.5	1.40
KJ-8	Kuju-Iwo yama A-region	Aug. 31, 1995	188.5	0.70	3.76	6.94	0.52	0.0269	1.41	0.135	19.0	0.758
KJ-9	Kuju-Iwo yama A-region	Aug. 31, 1995	297	0.39	3.82	5.78	0.32	0.0246	14.2	0.200	22.4	0.907
KJ-10	Kuju-Iwo yama C-region	Oct. 19, 1995	198.9	0.73	3.34	7.69	0.94	0.0217	28.5	0.386	33.9	8.90
KJ-11	Kuju-Iwo yama B-crater in 1995 eruption	Oct. 20, 1995	113.6	0.29	4.50	1.62	0.050	0.0415	308	1.16	91.8	2.35
KJ-12	Kuju-Kanko Hotel, Chojabaru	Jul. 24, 1996	132.0	<0.01	11.0	0.19	0.004	0.0509	3.10	1.03	95.4	12.8
C-I	Kuju-Iwo yama C-region	Oct. 9, 1996	96.6	0.37	4.37	2.10	0.23	0.0352	3.32	0.277	31.3	1.45
C-II	Kuju-Iwo yama C-region	Oct. 9, 1996	94.3	0.04	2.73	2.21	0.010	0.0182	3.99	0.190	19.6	0.615
C-III	Kuju-Iwo yama C-region	Oct. 9, 1996	94.1	0.12	4.33	1.86	0.006	0.0362	9.60	0.282	29.5	1.21
C-IV	Kuju-Iwo yama C-region	Oct. 9, 1996	251.3	0.31	5.89	4.63	0.095	0.0688	129	0.766	63.4	2.97
A-I	Kuju-Iwo yama A-region	Oct. 9, 1996	253.1	0.29	4.15	2.40	0.307	0.0378	8.86	0.242	25.5	1.12

(REM) NA: not analyzed

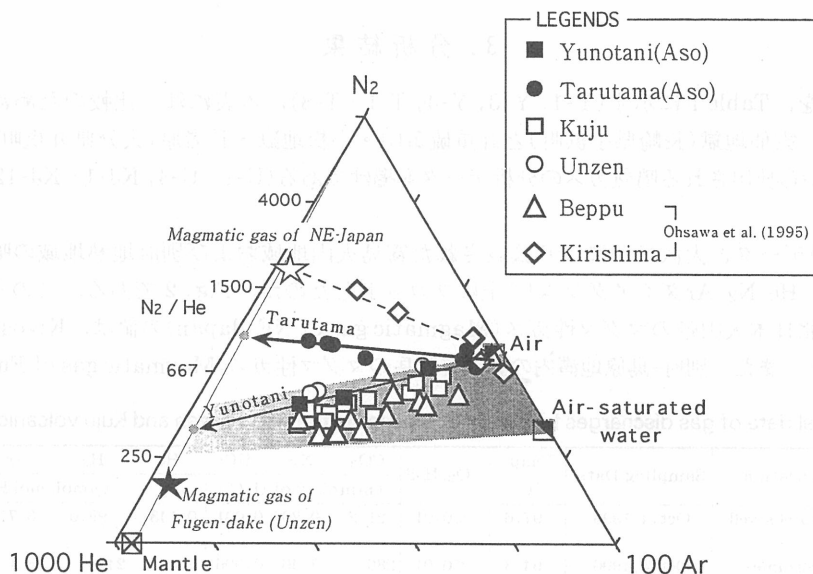


Fig. 2 Relative He, Ar and  $N_2$  contents of fumarolic gases from the Yunotani and Tarutama geothermal fields, Aso volcano and other volcanic and geothermal areas in Kyushu Island. The open asterisk indicates magmatic gas in Northeastern Japan estimated by Kiyosu (1986) and the solid asterisk shows magmatic gas from Mt. Unzen Fugen-dake collected by Hirabayashi et al. (1993). Thick and thin arrows show mixing lines between magmatic gas and air at the Tarutama and Yunotani geothermal fields, respectively. A broken line also represents a magmatic gas-air mixing line at the Kirishima volcanic region. Data of fumarolic gases from volcanic and geothermal areas in Beppu-Shimabara Graben (Beppu, Kuju and Unzen) are plotted in a hatched part.

は、1990年代前半の噴火期間に普賢岳山頂部の普賢池付近で平林ほか<sup>14)</sup>により得られたものである。この噴気ガスのHe/Ar比は2であり、世界各地のマグマ性気体に共通した値(1~6)<sup>15)</sup>の範囲内にあることから、筆者らはマグマ性であると判断した。Mantleの値はGiggenbachの論文<sup>12)</sup>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(論文ではBasaltic mantleという表現を用いている)。

今回阿蘇火山で得たデータのうち、湯の谷(Yunotani)は、別府(Beppu)・九重(Kuju)・雲仙(Unzen)の別府-島原地溝グループの範疇(図中の網かけの部分)にあり、湯の谷地域に噴出するマグマ性ガスの $N_2/He$ 比は370程度であると推定される。この値は、噴気ガスのデータ(■印)を結ぶ直線上でHe/Ar比がマンツルの値(2.9)<sup>12)</sup>に相当する点の $N_2/He$ 比として求めたものである。一方、垂玉(Tarutama)は、東北日本火山帯のマグマ性ガスと空気(Air)の混合線(図中の波線)と先の別府-島原地溝グループの中間に位置し、この地域に上昇してくるマグマ性ガスの $N_2/He$ 比はおよそ1000であると推定され(推定方法は湯の谷と同じ)、湯の谷地域のマグマ性ガスより $N_2$ に富んでいる。なお、東北日本火山帯および雲仙普賢岳のマグマ性ガス、マンツル起源ガスの $N_2/He$ 比は、上記の文献<sup>12~14)</sup>から、上述の垂玉、湯の谷と同様の方法により、それぞれ2000, 170, 10と推定される。

## 4. 議 論

同一の火山地域、特にわずか2 kmほどしか離れていない噴気地帯において、上昇してくるマグマ性ガスの不活性ガス組成(He-N<sub>2</sub>-Ar)に大きな違いが見られたのは、少なくとも我々がこれまでに調査してきた九州地方(別府・霧島・九重・雲仙)では初めてである。ここでの議論は、本研究により示された湯の谷と垂玉の噴気地域のマグマ性ガスが示す不活性ガス組成の違いの理由を説明するモデルを提示することを目的とする。

### 4-1. 従来のモデルに基づく議論

「マグマ性ガスに含まれるN<sub>2</sub>はプレートサブダクションに伴う海洋性堆積物の熱分解生成物である」という考え<sup>7)</sup>が、多くの研究者により支持されているので、ここでもまず、この考えにのっとって議論する。

九州地方におけるフィリピン海プレートの沈み込み方向がおおむね西北西であること<sup>16)</sup>を考慮すると、マグマ性ガスに含まれるN<sub>2</sub>の起源となる海洋性堆積物を乗せたプレートは、少なくともFig. 1中の薄いハッチを付けた領域(Front of subduction-type magmatism with oceanic sediments)の直下辺りまで達していることになる。これを模式的な断面図に表したのが、Fig. 3である。窒素に富む海洋性堆積物はプレートと共に水平距離にして200~300kmマントル内を突き進んで阿蘇火山の垂玉地域の直下に達しており、これによりサブダクション型のマグマ(ダイアピル)が発生している。一方、発生機構は不明であるが、湯の谷地域直下ではそれとは独立にマグマ(ダイアピル)が生成しており、両者は独立の経路をたどって地殻浅所まで上昇してきている(より正確には、N<sub>2</sub>が海洋性堆積物から放出されてから地表に噴出するまでにそれなりの時間を要すると思われるので、現在はそれに要した時間の分だけダイアピルを発生したプレートはさらに西北西へ進んでいるであろう)。しかし、吉田と瀬野<sup>17)</sup>は、地震学的には「現在の阿蘇はフィリピン海プレートの沈み込みに伴って生じている火山ではない」と考えており、このような結論の不一致がなぜ生じるのかを検討しなければならない。仮に、北が主張するように<sup>11)</sup>、地震学的には検知できないプレートが存在するとしても、そのプレート上には海洋性堆積物を乗せている部分(海溝側)とそうでない部分(背弧側)があり、現在その境界が阿蘇火山の辺りに存在することを認めなければならない。そうすると、この境界が沈み込みを始めた頃にフィリピン海プレートの沈み込み形態に大きな変化が起こったはずであ

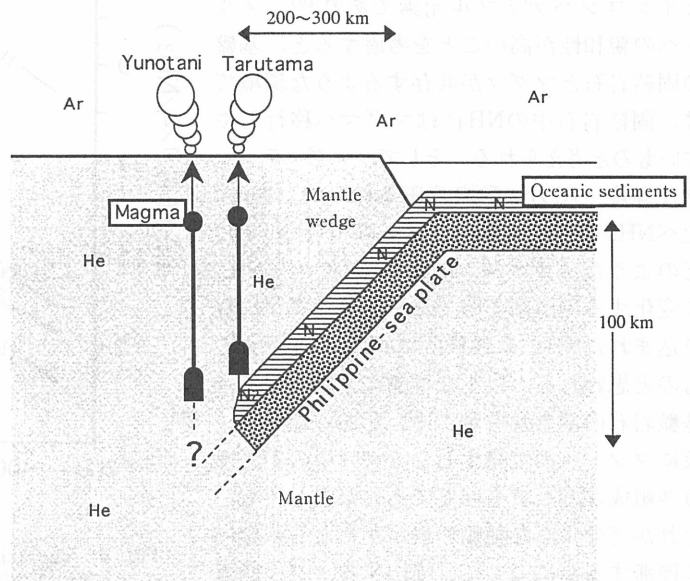


Fig. 3 Conceptual model explaining the characteristics of inert gas compositions at the Yunotani and Tarutama, Aso volcano in central Kyushu, based on the prevalent hypothesis, in which N<sub>2</sub> in magmatic gas is mostly derived from oceanic sediments dragged into mantle by subducting plate.

り、その現象の存否に關した地質学的な検討がなされる必要があろう。これ以外にも、1) 数kmという至近距離に発生した、性質(例えば含有される不活性ガスの組成)の異なる2つのマグマやダイアピリックマグマが互いに影響を及ぼさずに地表へ移動できるのか、2) 湯の谷地域の地下に想定されたマグマ発生機構とは具体的に何か、といった重要なことがらについて十分な説明がなされなければならない。

以上のように、マグマ性ガスに含まれる $N_2$ の起源をプレートの沈み込みに伴う海洋性堆積物の熱分解生成物のみを求める考え<sup>7)</sup>に立脚した解釈には、なお多くの解くべき問題が残されている。しかし、流体地球化学だけではそれらの問題の解決は見込めず、岩石学や地震学など他分野の研究手法の導入あるいは研究協力が是非とも必要であり、このような研究展開については今後の課題としたい。以下では、試みにこれまでとは異なった考えに基づいた解釈(モデル)について論じてみたい。

#### 4-2. 新たなモデルの提唱

ここで言うこれまでとは異なった考えとは、「マグマ性ガス中の $N_2$ の大半は先第三紀の基盤岩中の窒素化合物に由来する」というものである。地下深所のマントル内で発生したマグマは上昇して地殻内に停滞し、マグマ溜りを形成しているとするのが一般的な見方である。停滞したマグマは、周囲の固結岩石から揮発性の高い物質やケイ酸塩メルトに親和性のある元素を選択的に抽出したり、場合によっては固結岩石自身を取り込んだりするであろう<sup>18)</sup>。岩石中の窒素は $NH_4^+$ の形で $K^+$ を置換して存在している<sup>20)</sup>が、これは $Rb^+$ が $K^+$ と地球化学的に同様の挙動をするのと同じ理由(イオン半径の効果)によるものである。火成作用における $K^+$ は典型的なインコンパティブル元素であり<sup>19)</sup>、メルトへの親和性が高いことを考慮すると、基盤の固結岩石とマグマが共存するような環境では、固結岩石中の $NH_4^+$ はマグマへ移行しやすいものと考えられる。そして、マグマティックな温度・圧力・酸素分圧条件下では $N_2$ に比べ $NH_3$ の存在は無視できるので(Fig. 4)、どのようなメカニズムにより $NH_4^+$ から $NH_3$ に変化するのかは不明であるが、マグマに取り込まれた $NH_4^+$ は最終的には $N_2$ に変化するものと思われる。以上の推論に矛盾がなく、基盤岩石の窒素含有量に違いがあるならば、仮にマントル内で発生したマグマ中の不活性ガス組成がどこでも同じであったとしても、それがどのような種類の岩石からなる基盤内に停滞するかによって、噴出するマグマ性ガスの不活性ガス組成(例えば $N_2/He$ 比)に違いが見られるはずである。事実、岩石中の窒素の含有量(バルク)は、岩石の種類や産地によりppmオーダーから数100ppmと変化に富む

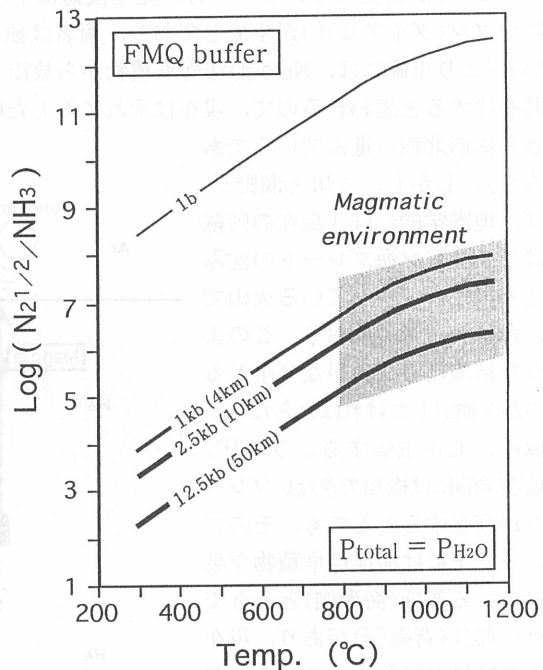


Fig. 4 Variations in nitrogen-ammonia ratio ( $N_2^{1/2}/NH_3$ ) in gas phase buffered by fayalite-magnetite-quartz as a function of temperature at various pressures (constructed using data in the data book [Kagaku binran]<sup>28)</sup>).

ことが知られている<sup>21)</sup>。窒素含有量と岩石種の関係については変成岩では比較的良く調べられており、窒素のバルク含有量は堆積岩(原岩)・低位変成岩・高位変成岩・花崗岩の順に低下する傾向がある<sup>20, 22)</sup>。従って、地殻を構成する岩石が堆積岩の場合の方が、変成岩の場合よりもマグマ性ガスのN<sub>2</sub>/He比は高くなると予想できる。なお、中央海嶺域やホットスポット地域で得られる海底玄武岩中の窒素濃度は0.9~2.8ppmであり<sup>20)</sup>、マントル物質の部分融解により生じるマグマあるいはマントル物質そのものの窒素含有量は堆積岩や変成岩に比べ桁違いに低いものと思われる。

Fig. 5は中部九州の地体構造図<sup>23)</sup>(第四紀や新第三紀の堆積物を取り除いた図)に著者らが加筆したものである。これは、モホ面より上の厚さ30km<sup>24)</sup>にも及ぶ地殻の概略的な地質構造を表しており、それらの大部分がプレート運動に伴う海洋性堆積物や海洋地殻の付加作用により生じた付加体である<sup>25)</sup>。中部九州には、長崎帯(Nagasaki Belt)・三郡帯(Sangun Belt)・肥後帯(Higo Belt)・領家帯(Ryoke Belt)・三波川帯(Sanbagawa Belt)・秩父帯(Chichibu Belt)・四万十帯(Shimanto Belt)が分布している。これらの境界は構造線により区切られているが、最も重要な構造線は臼杵-八代構造線(Usuki-Yatsushiro Tectonic Line)である。これは、西南日本を東西に走る中央構造線の西側の延長と考えられている構造線であり、これより南部の基盤岩は堆積岩類からなり北部のそれは主に変成岩類から構成される<sup>1)</sup>。変成岩や花崗岩からなる領家帯や三郡帯に位置している別府(Beppu)・九重(Kuju)・雲仙(Unzen)ではN<sub>2</sub>/He比の低いマグマ性ガスの噴出が推定されるのに対し(Fig. 2)、厚い堆積岩からなる四万十帯を基盤とする霧島火山群からは相対的に高いN<sub>2</sub>/He比(~2000)のマグマ性ガスが噴出しており、予想どおりの結果であることが分かる。次に阿蘇火山の湯の谷と垂玉について論ずることにしよう。

臼杵-八代構造線の北に接する領家帯と肥後帯は主に片麻岩などの高温低圧型変成岩や花崗岩質貫入岩よりなるが、大分-熊本構造線のすぐ南側には白亜系の堆積岩がとびとびに分布してお

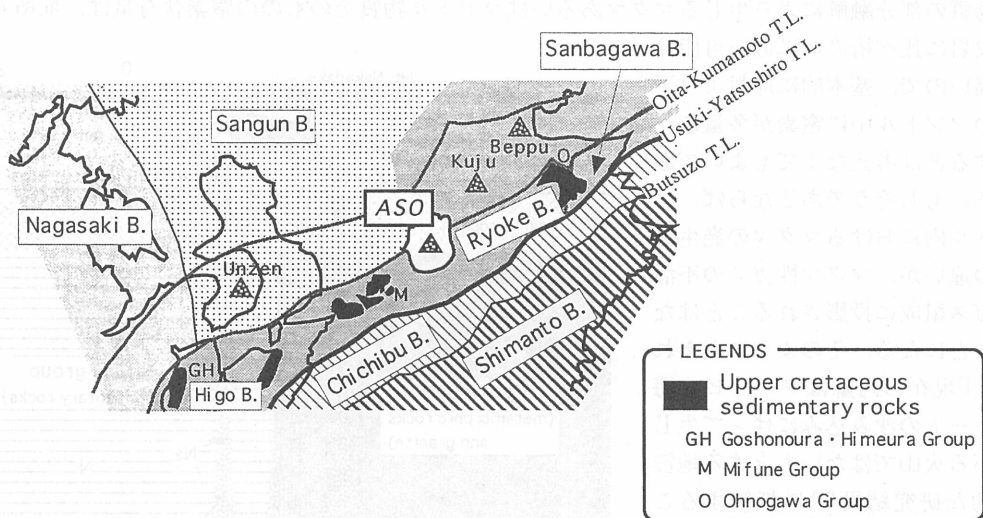


Fig. 5 Pre-Neogene tectonic framework of central Kyushu. B. and T.L. are abbreviations of Belt and Tectonic Line, respectively. Triangles indicate volcanoes. Chichibu and Shimanto Belts are mostly consisted of Jurassic and Cretaceous to Tertiary sedimentary rocks, respectively. Nagasaki, Ryoke and Sanbagawa Belts are characterized by Jurassic regional metamorphism. Sangun Belt is mainly composed by Permian to Triassic metamorphic rocks.



り(Fig. 5), 西から御所浦層群・姫浦層群・御船層群・大野川層群に分類される. このうち御船層群は, 熊本県阿蘇火山の下位にまで分布するとされており<sup>1)</sup>, 実際に阿蘇カルデラの南郷谷(中央火口丘群の南)で行われたボーリングでは深さ242mで白亜紀の堆積岩に達している<sup>26)</sup>. 一方, 中央火口丘群の北側のカルデラ底のボーリングでは, 150~480mの深さで白亜紀の花崗岩基盤が検出された<sup>26)</sup>. 第3節で述べたように(Fig. 2), 湯の谷地域と垂玉地域に上昇してくるマグマ性ガスの $N_2/He$ 比は, それぞれ370, 1000程度と推定され, 明らかに湯の谷の南約2 kmに位置する垂玉地域のマグマ性ガスの方が $N_2$ に富んでいる. 基盤の花崗岩と堆積岩の境界が湯の谷と垂玉の間にあるとすれば(Fig. 1の濃いハッチを付けた領域[Basement boundary]), 花崗岩基盤の場所に位置する湯の谷よりも堆積岩を基盤とする垂玉からの方がより $N_2$ に富んだ( $N_2/He$ 比の高い)マグマ性ガスが放出されていることを矛盾なく説明できる. 垂玉地域に噴出するマグマ性ガスの $N_2/He$ 比(~1000)が, 同様に堆積岩を基盤にもつ霧島火山地域のそれ(~2000)より低いのは, 基盤岩(御船層群と四万十帯)の規模の違いが反映されているからであろう. 以上の考察結果を基に作成した阿蘇火山における模式的な地下断面図(南北方向)が, Fig. 6である. 阿蘇火山の岩石群は, 一つのマントルダイアピルに由来し<sup>1)</sup>, カルデラを形成したマグマ溜りが天井の陥落によって分割され, 天井の破砕部分に上昇してきたマグマにより幾つかのキュボラが作られることによりマグマはそれぞれ独立に分化し, 中央火口丘群の各火山を形成することになった<sup>26)</sup>と考えられている. Fig. 6のモデルに示されたマグマの形状は, そのような岩石学・地質学的な研究により導かれた有り様とかなり調和的である.

以上のように, 少なくとも離島域を除く九州本土の火山・地熱地域に噴出するマグマ性ガスについては, それに含まれる $N_2$ の大半は先第三紀の基盤岩中の窒素化合物に由来するとする仮説に基づくことによって矛盾なく説明できそうである. 今回の我々のモデルの大きな特徴は, プレーートの沈み込みによる窒素循環をあまり重視していないことである. 前にも示したように, マントル物質の部分融解により生じるマグマあるいはマントル物質そのものの窒素含有量は, 堆積岩や変成岩に比べ桁違いに低い可能性が高いので, 基本的に地殻より下位のマントル中に窒素が多量に存在するとは考えなくてもよいであろう. もしそうであるならば, マントル内におけるマグマの発生環境の違いが, マグマ性ガスの不活性ガス組成に投影されることはないことになる. そのように考えれば, 「現在の阿蘇はフィリピン海プレート沈み込みに伴って生じている火山ではない」とする地震学的な研究結果<sup>17)</sup>に抵触することもなくなる. このように, 今回提示したモデルが流体地球化学以外の研究分野から見て許容できるものであるか否かについては, 今後必要に応じて検討されていくべきであろう. 最近, 雲仙火山地

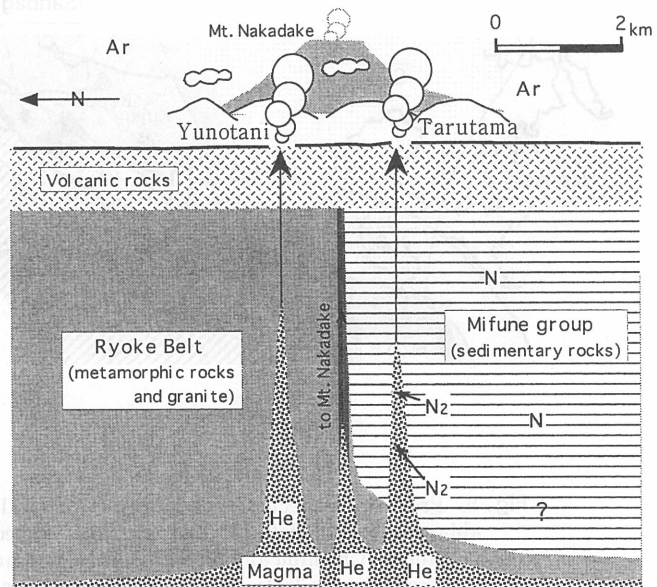


Fig. 6 Schematic vertical cross-section showing underground geological structure and geochemical environment around the Aso volcanic-geothermal region.

域の温泉ガスのヘリウム同位体比に関する研究から、マグマ性のHeが地殻内の上昇過程で放射壊変生成物である $^4\text{He}$ によって汚染される場合のあることが示唆されている<sup>27)</sup>ことから、今回提示した「マグマ性ガス中の $\text{N}_2$ の大半は、プレートサブダクションに伴う海洋性堆積物の熱分解生成物ではなく、先第三紀の基盤岩中の窒素化合物に由来する」とする仮説は、今後も検討を重ねていく価値はありそうである。

## 5. おわりに

本研究では、まず阿蘇火山の湯の谷と垂玉の噴気地帯で採取した噴気ガスの化学分析を行い、その不活性ガス組成について検討を加えた。分析データの解析から推定されたマグマ性ガスの $\text{N}_2/\text{He}$ 比は、湯の谷地域がおよそ340であるのに対し、垂玉地域のそれは約1000と3倍近く高いことが明らかとなった。このように同一火山に属する噴気地帯において、深部より上昇してくるマグマ性ガスの $\text{N}_2/\text{He}$ 比に大きな違いが見られたのは、我々が行ってきた調査では今回が初めてである。また、九州本土のその他の火山・地熱地域(別府・九重・雲仙・霧島)で得たデータとの比較検討を行ったところ、湯の谷地域のガスは、別府-島原地溝グループ(別府・九重・雲仙)に属するが、垂玉地域のガスは霧島火山地域と同様に $\text{N}_2$ に富み、明らかにこのグループには属さないことが分かった。以上の特徴は、「マグマ性ガス中の $\text{N}_2$ の起源は、プレートの沈み込み運動に伴った海洋性堆積物にあるのではなく、先第三紀の基盤岩中に存在する窒素化合物に由来する」という考えにより、他の分野の見解にも抵触することなく説明することができそうである。今後、この考えの当否を実証的に検討していかなければならないが、厚い大陸地殻の存在しないサブダクション帯に位置する火山・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と考えている。現在その調査の準備をしている最中であり、得られた結果については逐次報告する予定である。

## 謝 辞

試料の採取は、熊本県阿蘇郡長陽村の阿蘇観光ホテルおよび清風荘の関係者の承諾により実現したものである。京都大学理学部附属地球熱学研究施設の田中良和助教授は垂玉の調査(第1回)に同行され、試料採取に協力された。2名の匿名査読者からは本文を改善するにあたり有意義なご指摘を頂いた。これらの方々には厚く御礼申し上げます。また、本研究に要した費用の一部は、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)によるものであり、記して謝意を表する。

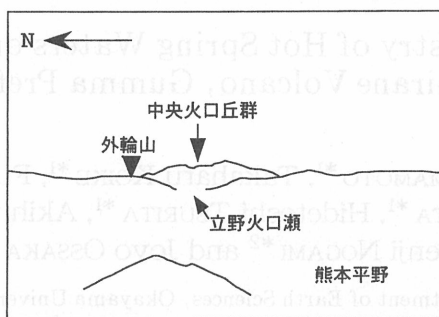
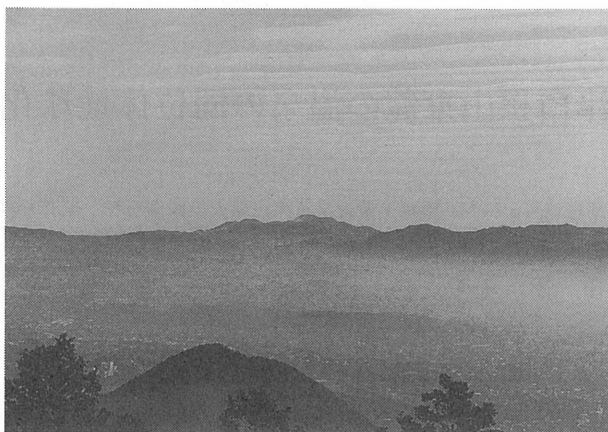
## 参考文献

- 1) 唐木田芳文，早坂祥三，長谷義隆(編)：日本の地質9 九州地方，共立出版，東京，371p.，1992.
- 2) 小坂丈予，平林順一，小沢竹二郎，君島克憲：阿蘇火山の集中総合観測(第1回)報告(1977年8～12月)，64-68，1978.
- 3) 小坂丈予，平林順一，小沢竹二郎：阿蘇火山の集中総合観測(第2回)報告(1981年8～12月)，82-84，1984.
- 4) 山崎達雄，林 正雄，古賀昭人，野田徹郎，福田道博：地熱，15，205-216，1978.

- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成元年度全国地熱資源総合調査(第3次)広域熱水流動系調査阿蘇地域流体地化学調査報告書要旨, 144p., 1990.
- 6) Kita, I., Nitta, K., Nagao, K., Taguchi, S., Koga, A.: *Geology*, **21**, 391-394, 1993.
- 7) Matsuo, S., Suzuki, M., Mizutani, Y.: *Terrestrial Rare Gases* (Alexander, E.C.Jr., Ozima, M. eds.), Japan Science Society Press., 17-25, 1978.
- 8) 由佐悠紀, 大沢信二, 福田洋一, 須藤靖明: クリーン地殻エネルギー抽出法の設計基礎論・平成6年度科学研究費補助金・重点研究研究成果報告書, 13-18, 1995.
- 9) 大沢信二, 由佐悠紀, 北岡豪一: *温泉科学*, **45**, 290-294, 1995.
- 10) Ohba, T., Nogami, K., Hirabayashi, J.: *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **42**, 1-15, 1997.
- 11) 北 逸郎: *地質ニュース*, 488, 19-23, 1995.
- 12) Giggenbach, W.F.: *Proc. Water-Rock Interaction*, **7**, 873-878, 1992.
- 13) Kiyosu, Y.: *Geochemical Journal*, **19**, 275-281, 1986.
- 14) 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.
- 15) Mazor, E.: *Geothermics*, **5**, 21-36, 1977.
- 16) 山崎文人, 大井田 徹: *地震*, **38**, 193-201, 1985.
- 17) 吉田明夫, 瀬野徹三: *火山*, **37**, 297-301, 1992.
- 18) 久野 久: *火山及び火山岩*, 岩波書店, 東京, 255p., 1954.
- 19) 松尾禎士(編): *地球化学*, 講談社, 東京, 266p., 1989.
- 20) 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.
- 21) 市原優子: *地質学雑誌*, **98**, 885-899, 1992.
- 22) Hoefs, J.: *Stable Isotope Geochemistry*, 3rd. ed., Springer-Verlag, Berlin, 184-197, 1987.
- 23) 斎藤靖三: *日本列島の生立ちを読む*, 岩波書店, 東京, 147p., 1992.
- 24) 吉井敏尅: *日本の地殻構造*, 東京大学出版会, 東京, 54-60, 1996.
- 25) 平 朝彦: *日本列島の誕生*, 岩波書店, 東京, 226p., 1990.
- 26) 小野晃司, 渡辺一徳: *阿蘇火山地質図*, 地質調査所, つくば, 8p., 1985.
- 27) Kita, I., Nagao, K., Taguchi, S., Nitta, K., Hasegawa, H.: *Geochemical Journal*, **27**, 251-259, 1993.
- 28) 日本化学会(編): *化学便覧 基礎編II*, 改訂3版, 丸善, 東京, 781p., 1984.

#### 参考文献

[付 録]



写真A 熊本市からの阿蘇火山の遠望  
(1992年11月17日竹村恵二氏撮影)



写真B 阿蘇中岳第一火口の火口底噴気群  
(1992年9月20日撮影)

火山活動が穏やかな時期には火口内に水が溜るため、火口底の噴気群は水没する。溜り水は噴気ガスの影響を受け、強い酸性(pH<1)を呈し、水温は60~70℃まで上昇する。