

インドネシア・フローレス島バジャワ地熱地帯地化学調査

高橋 正明¹⁾

1. はじめに

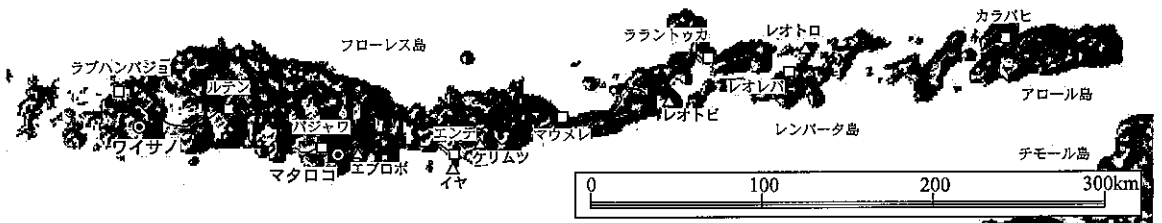
インドネシアの地熱発電容量は、ジャカルタのアメリカ大使館2002年報告 (<http://www.usembassyjakarta.org/econ/geothermal.html>) によれば787MW, IGA報告 (<http://iga.igg.cnr.it/electricitygeneration.php>) によれば769.5MWである。イタリアの地熱発電容量が785MW (IGA報告) であるので、インドネシアの地熱発電容量はアメリカ(2,228MW)、フィリピン(1,909MW)、メキシコ(855MW)に次ぐ世界第4位あるいは5位である(数字はいずれもIGA報告)。ちなみに世界第6位は日本であるがその発電容量は533.25MW (<http://www.nedo.go.jp/chinetsu/keimou2/indexe.htm>) であり、250MWもの開きがある。また上述したアメリカ大使館2002年報告には、インドネシアでは1997年に始まった財政危機のため地熱発電所建設計画に遅れが生じているが、2010年までにさらに2,005MWもの容量アップを目指していることが記述されている。実現すれば、現在第1位のアメリカを抜いて世界第1位に躍り出ることになる。いずれにせよ世界で最も魅力的な地熱開発地域の1つであることにはまちがいが無い。なお、アメリカ大使館2002年報告には、フローレス島・マタロコの

調査、坑井掘削、噴気試験等の結果が盛り込まれていない。残念である。

インドネシアは、地質構造の複雑さ、未調査地域の広大さなどから、科学的にも魅力的な地域の1つである。筆者は、1997年に始まった「遠隔離島小規模地熱の探査に関する共同研究」の一環として地化学調査を行ってきたが、いくつかの興味深い知見について深化させることなく調査期限を迎えた。以下では3つの知見を紹介し、インドネシアの科学的魅力の証左としたい。

2. ワイサノ地熱地帯から得られる高塩濃度の温泉

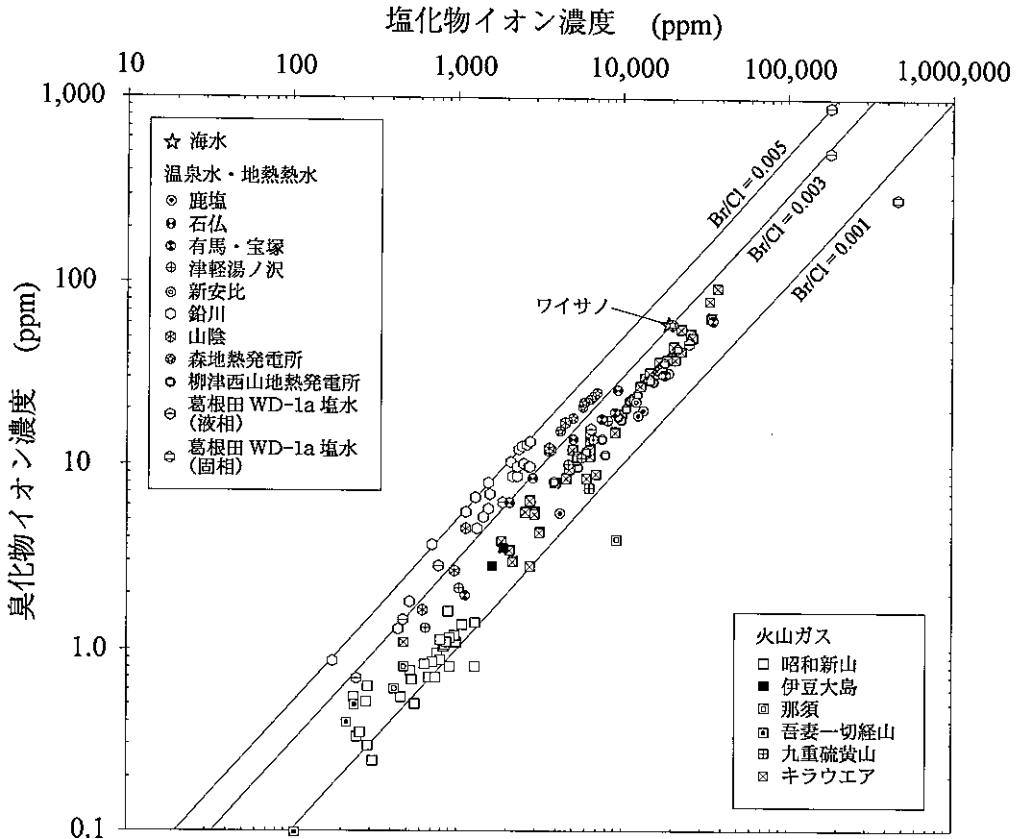
ワイサノの地熱地帯は、バジャワの西方約100km、ワイサノ火山のカルデラ湖の南東側湖畔(標高650m)に位置している(第1図)。20世紀初頭には硫気地帯も存在していたようである(1997年時点では消失)。1997時点では本地帯に多数分布する温泉の最高温度は84°Cであったが、1970年代の調査報告では温泉の最高温度は92°Cとされている(ただし同じ温泉であるか否かは不明である)。なおワイサノ地熱地帯の詳細は<http://www.vsi.dpe.go.id/pbumi/bali/waisanotxt.html>を参照。



第1図 フローレス島の陰影図。□: 県庁所在地; 実線: トランスフローレスハイウェイ。◎: 本文中に名称が登場する調査地域; △: 本文中に名称が登場する火山。

1) 産総研 深部地質環境研究センター

キーワード: インドネシア, フローレス島, Br/Cl比, He/Ar-N₂/Arダイアグラム, d値, 地化学調査



第2図 起源が高温火山ガス、有馬型温泉、化石海水と考えられるいくつかの温泉、地熱発電所および火山から得られる温泉・地熱流体・火山ガスのBr/Cl比。

84℃の温泉は、シリカセンターにできた50cm四方程度の穴から湧出していた。村人の話では、1日に3回、50cm程度吹き上げる間欠泉であるとのことであった(高橋ほか, 1998; 地質ニュース521号の口絵4,5)。温泉水試料を日本に持ち帰り化学分析を行った結果、塩化物イオン濃度が20,000ppmもある中性食塩泉であることがわかった。また、温泉水の同位体組成を測定してみると、酸素同位体組成は+4.4%、水素同位体組成は-31%という値であった(Takahashi et al., 2002a)。この値は、酸素同位体組成で+5~+8%、水素同位体組成で-15~-35%という島弧域の高温火山ガスの値(例えば、日下部・松葉谷, 1986)とほとんど同じ値である。

一方、温泉水の臭化物イオン濃度は59.2ppmであり(Takahashi et al., 2002a)、臭化物イオンと塩化物イオンの比(Br/Cl比)は 3.0×10^{-3} となった。ハロゲン元素の挙動は互いに似ているため、その

比は蒸発・凝縮といった様々な物理的過程では(例えば海水の二相分離のような条件においても)変化しないと考えられている。そのため、ハロゲン元素、特に塩素、臭素、ヨウ素相互の比を利用した地熱流体等の起源の研究が行われてきている(例えば上村ほか, 1988)。しかしhttp://www.gfz-postdam.de/pb4/pg1/B_Geochemyc/b12fraclibrcl.htmlには、地熱流体が高濃度の液相と低濃度の気相に分離する時にはBr/Cl比に変動が生じる可能性があると述べている。この場合起源の解析には注意を要することになる。

第2図に、起源が高温火山ガス、有馬型温泉、化石海水と考えられるいくつかの温泉、地熱発電所から得られる温泉水・地熱流体の臭化物イオンと塩化物イオンの比(Br/Cl比)をいくつか示した(詳細は、上村ほか1988; 高橋ほか, 2000。これらの水の水素・酸素同位体組成は、水素同位体組成で-15~-35%程度、酸素同位体組成が+5~+8%程

度の端成分1と各地域の天水の水素・酸素同位体組成(端成分2)の混合線上に分布している), また第2図には海水の値(3.4×10^{-3} : Mason, 1966, 194p.)も同時に示した. 第2図から, 一口に流体の起源が高温火山ガス, 有馬型温泉, 化石海水と言ってもBr/Cl比は0.001~0.005の広い範囲に分布しており, Br/Cl比を流体の起源の解析に用いるには, 他の指標との関係も考慮する必要があることが示唆される.

また第2図からは, 北海道茅部郡森町にある北海道電力森発電所で使用している濁川地熱系の地熱流体は, 酸素同位体組成が+3.9%, 水素同位体組成が-34.7%という島弧域高温火山ガスに近接する値であるのに対し, そのBr/Cl比は海水そのものの値を持っている(Yoshida, 1991)こともわかる. 濁川地熱系では, 海水起源と火山性流体(マグマ起源物質)起源という2つの全く異なる地熱流体の形成機構が提唱されている(高橋, 1994)が, 今回ワイサノ火山というインドネシアの島弧火山から, 濁川地熱系と同様の水素・酸素同位体組成及びBr/Cl比を持つ温泉水が得られたことは, 相互補完的に両者の地熱流体が火山性流体であることを示唆しているように見え, 非常に興味深い. 流体のBr/Cl比と水素・酸素同位体組成の関係については必ずしも明瞭にされている訳ではないので, 今後さらに研究を続けていく必要があると思われる.

3. マタロコ地熱井から得られる地熱ガス

バジャワ市南東約11kmに位置するマタロコ地区(第1図)において, インドネシア火山調査所と新エネルギー・産業技術開発機構による地熱坑井の掘削が行われた(Sueyoshi *et al.*, 2002). 地熱坑井から噴出する地熱流体をセパレータを使い, 液相部分と気相部分に分離する. 気相部分を冷却すると水蒸気と冷却により凝結しないガス(非凝結性ガス)に分離できる. 非凝結性ガスにアルカリ性の溶液を適量添加すると, アルカリ性溶液に吸収されるガス(二酸化炭素, 硫化水素, 二酸化硫黄, 塩化水素等)と吸収されないガス(Rガス)に分離できる. Rガスの組成は水素, 窒素, ヘリウム, アルゴン, メタン等であるが, 流体や鉱物と反応しにくい窒素, ヘリウム, アルゴンの比(He/Ar-N₂/Arダイ

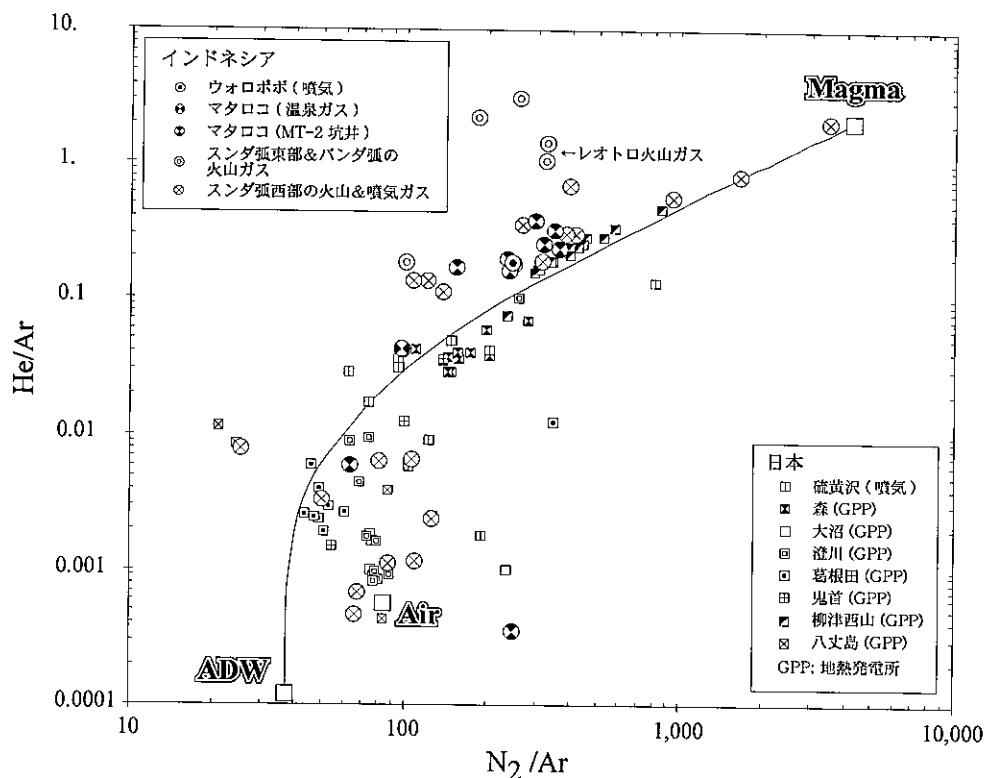
アグラム)を調べると, これらのガスの起源を調べることができる(例えばKiyosu, 1985).

第3図にマタロコ地熱井と付近にあるウォロボボの噴気孔から得られたRガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの比(Matsuda *et al.*, 2002; Takahashi *et al.*, 2002a; マタロコ地熱井の一部データは未公表)を示した. 第3図には日本のいくつかの地熱発電所, 及びインドネシアのいくつかの火山, 噴気地帯から得られるRガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの比(Pooter *et al.*, 1991; Giggenbach *et al.*, 2001), および日本の東北地方の火山噴気から推定されるマグマ中のRガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの比(第3図中でMagmaと表示: Kiyosu, 1985)と地下水に溶存しているガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの比(第3図中でADWと表示)との混合線も同時に示した.

第3図から, マタロコ地熱井, ウォロボボ噴気孔及びマタロコ温泉ガスで得られるRガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの比は, ジャワ島等スンダ列島西部の火山, 噴気地帯の噴気孔から得られるガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの比と同様に, MagmaとADWの混合線の近傍に位置していることがわかる. このことは, マタロコ周辺で得られる坑井ガス・噴気ガス・温泉ガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの起源は, ジャワ島等スンダ列島西部の火山ガス・噴気ガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの起源と類似している可能性があることを示唆している.

一方, フローレス島の東隣の島であるレンバータ島にあるレオトロ火山(第1図及び高橋ほか(1998)の写真6参照)と, バンダ諸島にある火山の噴気孔から得られるRガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの比とマタロコ付近のそれを比較すると, 窒素とアルゴンの比は同じであるが, ヘリウムとアルゴンの比が, 1桁~2桁大きいことがわかる. そのため第3図中では, MagmaとADWの混合線から上方向に大きく離れて各点がプロットされている. このことは, レンバータ島以東の火山ガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの起源は, マタロコ以西の坑井ガス・噴気ガス・温泉ガス・火山ガス中の窒素, ヘリウム, アルゴンの起源とは異なっている可能性があることを示唆している.

インドネシア東部の地質構造は極めて複雑であ



第3図 インドネシアと日本のいくつかの地熱発電所、火山および噴気ガスのHe/Ar-N₂/Arダイアグラム。

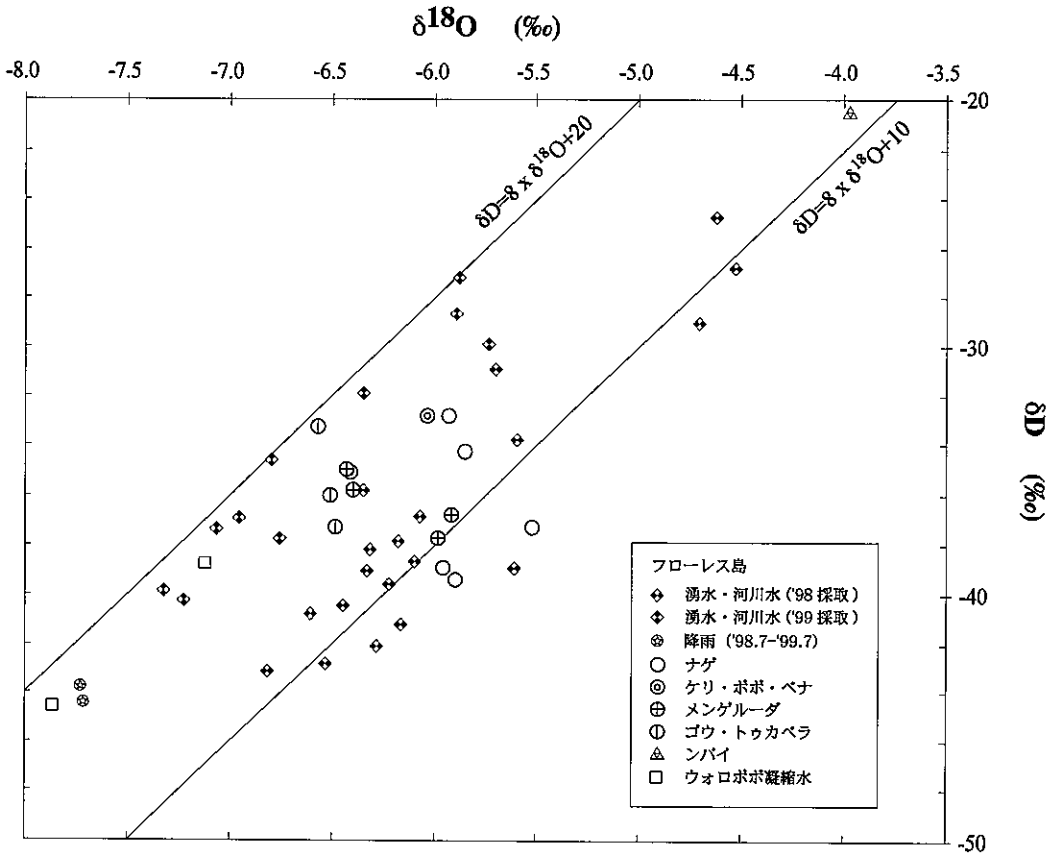
る(McGaffrey (1988) の Fig. 1, Muraoka *et al.* (2002) の Fig. 2 参照)。スマトラ島沖から続くジャワ海溝はスンバ島沖あたりでチモールトラフ、アルートラフと名前が変わる。ジャワ海溝の南の海底の深度は5,000mもあるのに、チモールトラフの南、アルートラフの東の海底の深度は200m程度である。ユーラシアプレートの下に潜り込んでいるインド-オーストラリアプレートの構成が、ジャワ海溝では海洋地殻であるのに対し、チモールトラフ、アルートラフでは大陸地殻に変化しているのである(Pooter *et al.* (1991) の Fig. 1 参照)。大陸地殻のヘリウムとアルゴンの比は4.5程度と非常に大きいことがわかっている(例えばAndrews *et al.*, 1989)ので、レンバータ島のレオトロ火山から急激にヘリウム/アルゴン比が高まるのは、そのあたりから大陸地殻の潜り込みの影響が始まることを意味するのもも知れない。

フローレス島は東西300kmもある非常に細長い島で、マタロコ地熱地帯の東にもエプロボ、イヤ、レオトビ等噴煙を上げる火山やソコリア(いちばん近い火山はケリムツ火山)のような地熱地帯が多数あ

る(第1図)。それらの場所から噴気・地熱ガスを採取し、その窒素、ヘリウム、アルゴン等のガス組成を比較すれば、潜り込みが海洋地殻から大陸地殻に変化する状況を地球化学的に克明に調査できる可能性があり、極めて興味あることと考える。

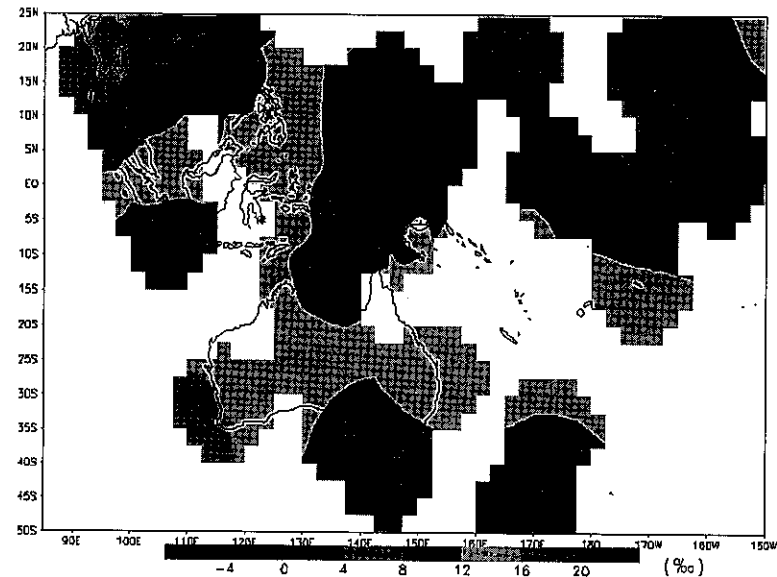
4. バジャワ周辺地下水・湧水のd値

バジャワ市周辺に分布する温泉水の起源を調査するため、1997年夏と1998年夏に半径50km以内に分布する温泉水、湧水及び沢水を採取し、その水素及び酸素同位体組成を測定した。(水素同位体組成 -8×酸素同位体組成)という計算式で定義されるd値は、雨を降らす気団が形成されるときに状況を反映していると考えられている。例えば日本では夏季の雨のd値は10程度、冬季の雨・雪のd値は25程度である場合が多いが、夏季の雨は湿った海洋性気団に、冬季の雨・雪はもともとは乾燥した大陸性気団にそれぞれ由来していることによる。このことはd値は降水をもたらす気団の違いを反映しており、同じ季節に採取した水試料のd値は降水

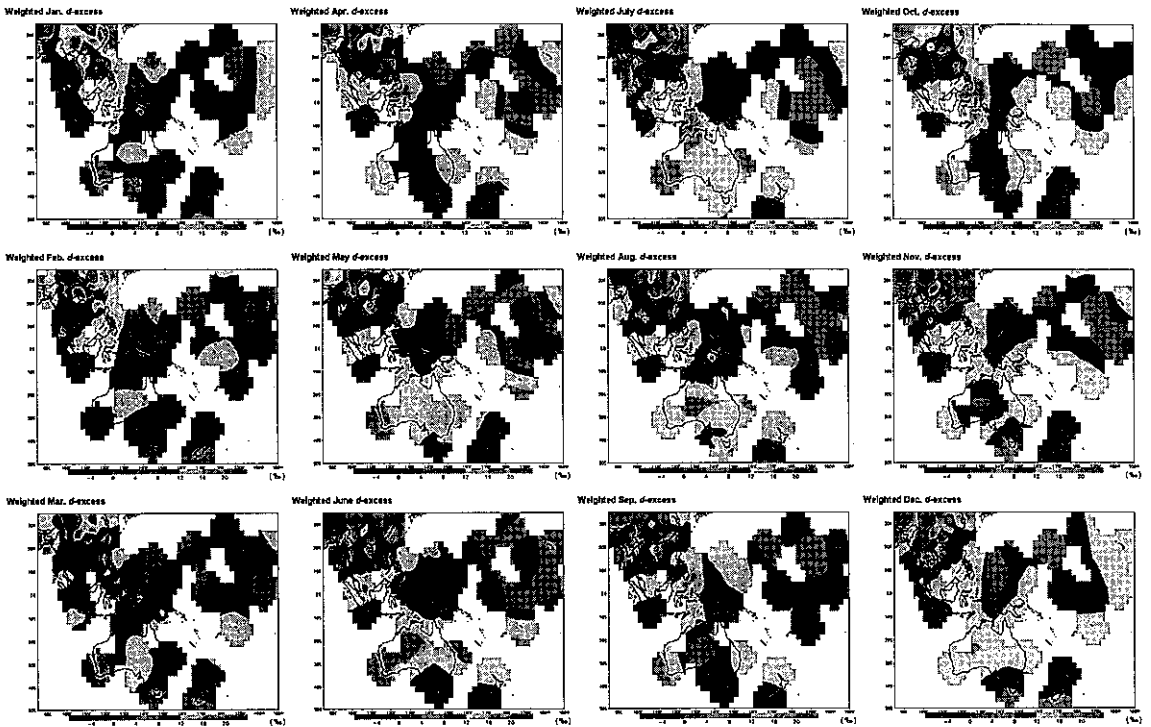


第4図 フローレス島バジャワ市周辺50kmで採取した湧水・河川水・温泉水試料のδD-δ¹⁸Oダイアグラム。

Weighted Annual d-excess



第5図 南太平洋地域の降水のd値分布(年平均, IAEA, 2001)。



第6図 南太平洋地域の降水のd値分布(1月～12月の各月, IAEA, 2001)。縦方向に1月～3月のような順序で並べてある。

機構が著しく変化しないかぎりあまり変動しないと考えるのが一般的である。ところが第4図に示したように、バジャワ市周辺の湧水等では、1997年夏に採取した水試料のd値は10程度、一方1998年夏に採取した水試料のd値は20程度と、同じ夏季に採取しているのに著しい変動が観測された。

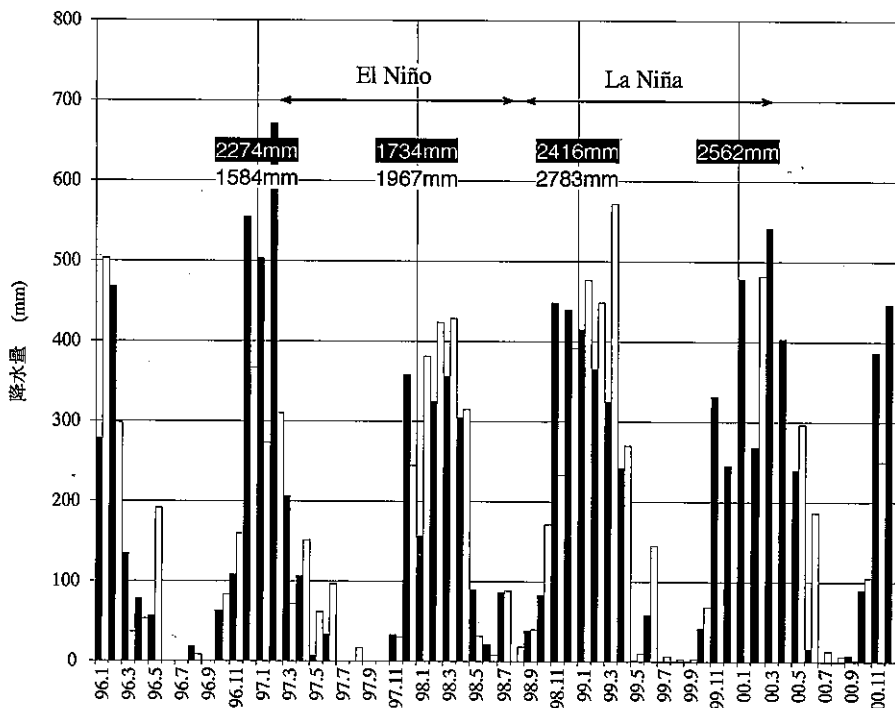
<http://isohis.iaea.org/userupdate/waterloo/index.htm>内にある南太平洋地域の項目を見ると、インドネシア周辺の降水の月別及び年平均のd値の分布(上記のページ内ではd-excessと表示されている)が示されている(分布図は世界にある550の観測点から389点を選定し、1961年から1999年の間の各月ごとの降水量および降水の水素・酸素同位体組成を用いて描かれた: IAEA, 2001)。フローレス島付近は観測地点網の穴になっているが、周辺地域のd値の変化から以下のことが推定できる。

(1) フローレス島は、フィリピン、オーストラリア、南太平洋西部と続く年平均のd値が12-16の地域に区分されている(第5図)。1998.7-1999.9に、イネリエ・エプロボ両火山観測所で採取した降水のd値は18.5及び17.9であり(Takahashi *et al.*, 2002b)、概略一致している。これらのd値が大きい地帯は、

熱帯のサバンナ・モンスーン気候区～乾燥気候区(雨季と乾季の雨の差が大きな地域。例えば、<http://metart.fao.org/~gbr/E-CLimGL.htm>で乾季と雨季の降雨量差、気候区を表示できる)に対応しているように見える。

(2) フローレス島付近の各月ごとのd値の変動を見ると(第6図)、3月頃にはd値が8以上と一番小さい値になる。d値が8以上の地域が近接していたり、8以上の地域と12以上の地域に挟まれていたりする月は1～6月(8月にも出現)である。一方、7月頃にはd値が16以上と一番大きい値になる。d値が12以上あるいは16以上の地域に含まれているのは7～12月である。

(3) バジャワ地域周辺ではイネリエとエプロボ両火山観測所で降水量の観測が行われている(降水量データは、Takahashi *et al.* (2002b)を参照: 第7図)。1997-98年の雨季には1,734mmと1,967mmの降水量が、1998-99年の雨季には2,416mmと2,783mmの降水量がそれぞれ観測されている。第6図に示したように、1997-98年雨季では、雨季全体の降水量に占める雨季開始～年内の降水量の割合が、イネリエ観測所で22.6%、エプロボ観測所で



第7図 イネリエおよびエプロボ両火山観測所における降水量。薄灰色はイネリエ観測所、白色はエプロボ観測所における観測値。

14.8%であるのに対し、1998-99年雨季では41.8%と30.7%と、1997-98年雨季と1998-99年雨季とでは降水パターンが異なる。1996-97年雨季では32.7%と39.1%であることを考えると、1997-98年雨季では、雨季開始-年内の降水量が年始-雨季終了の降水量に比べ非常に少ない。1997年冬～1998年春はエルニーニョ期、1998年冬～1999年春はラニーニャ期にあっている(詳細は、例えば<http://www.elnino.noaa.gov/>を参照)。1997-98年雨季の降水量や降水パターンが、1998-99年雨季のそれと相当異なるのは、エルニーニョ/ラニーニャといった地球規模の気象現象に影響された結果であると考えられる。

1998-99年雨季の降水の方が、年後半、すなわち雨季開始-年内というd値が大きい時期の降水の影響がより大きいため、降水の平均としては1997-98年雨季より1998-99年雨季の方がd値が大きくなるのが推定できる。

(4) 河川水や湧水の滞留時間は明らかではないが、1998年夏の河川水、湧水はその直前の雨季である1997-98年雨季の降水の影響を、同様に1999年夏の河川水、湧水は1998-99年雨季の降水の影響を

より強く受けていると考えれば、1999年夏の河川水、湧水のd値が大きく、1998年夏の河川水、湧水のd値が小さいことが矛盾なく説明できる。

5. おわりに

1997年以来、スハルト、ハビビ、ワヒド、メガワティと4人の大統領がめまぐるしく交代した。円からルピアへの交換率が20程度であったものが70程度になった。一時は100程度にもなった(レンタカー代などの資金を1億ルピアも運んでいったこともあった)。

バジャワでは白熱電球が蛍光灯に交換され夜が少し明るくなった。レストランには冷蔵庫が、ホテル(losmen)にはカラオケが、病院には何故だか電飾が登場した。当然の帰結として夜間の停電が多くなった。日本人観光客に出会うようになった。日本語のフローレス島観光のための詳細なウェブページもできた。バジャワ市で宿泊した2軒のホテル、いつも食事をしたレストラン等詳細に記述されている(<http://www.itisnet.com/japanese/asia/indonesia/bajawa/j-bajawa.htm>)。

ヌサ・テンガラの島々はこれからどのように変化、発展していくのであろうか？ これからも見守って行きたい気持ちで一杯である。

最後になりますが、「選隔離島小規模地熱の探査に関する共同研究」に参加された全ての方々に感謝いたします。

参考文献

- Andrews, J. N., Hussain, N. and Youngman, M. J. (1989) : Atmospheric and radiogenic gases in groundwaters from the Stripa granite. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 53, 1831-1842.
- Giggenbach, W. F., Tedesco, D., Sulistiyo, Y., Caprai, A., Cioni, R., Favara, R., Fischer, T. P., Hirabayashi, J., Korzhinsky, M., Martini, M., Menyailov, I. and Shinohara, H. (2001) : Evaluation of results from the fourth and fifth IAVCEI field workshops on volcanic gases, Vulcano island, Italy and Java, Indonesia. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 108, 157-172.
- IAEA (2001) : GNIP Maps and Animations, International Atomic Energy Agency, Vienna. Accessible at <http://isohis.iaea.org/>.
- 上村京子・高松信樹・今橋正征 (1988) : 食塩泉のBr/Cl比について。 *温泉科学*, 38, 111-119.
- Kiyosu, Y. (1985) : Variation in N_2/Ar and He/Ar ratios of gases from some volcanic areas in Northeastern Japan. *Geochem. J.*, 55, 183-193.
- 日下部 実・松葉谷 治 (1986) : マグマ揮発物質・火山ガス・地熱水。 *火山*, 30, S267-S283.
- Mason, B. (1966) : Principles of geochemistry. 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc., New York-London-Sydney, 329p.
- Matsuda, K., Sriwana, T., Primulyana, S. and Futagoishi, M. (2002) : Chemical and isotopic studies of well discharge fluids of the Mataloko geothermal field, Flores, Indonesia. *Bull. G. S. J.*, 53, 343-353.
- McGaffrey, R. (1988) : Active tectonics of the eastern Sunda and Banda arcs. *J. Geophys. Res.*, 93, B12, 15163-15182.
- Muraoka, H., Nasution, A., Urai, M., Takahashi, M., Takashima, I., Simanjuntak, J., Sundhoro, H., Aswin, D., Nanlohy, F., Sitorus, K., Takahashi, H. and Koseki, T. (2002) : Tectonic, volcanic and stratigraphic geology of the Bajawa geothermal field, central Flores, Indonesia. *Bull. G. S. J.*, 53, 109-138.
- Pooter, R. P. E., Varekkamp, J. C., Poreda, R. J., van Bergen, M. J. and Kreulen, R. (1991) : Chemical and isotopic compositions of volcanic gases from the east Sunda and Banda arcs, Indonesia. *Geochimica Cosmochimica Acta.*, 55, 3795-3807.
- Sueyoshi, Y., Matsuda, K., Shimoike, T., Koseki, T., Takahashi, H., Futagoishi, M., Sitorus, K. and Simanjuntak, J. (2002) : Exploratory well drilling and discharge test of MT-1 and MT-2 in the Mataloko geothermal field, Flores, Indonesia. *Bull. G. S. J.*, 53, 307-321.
- 高橋正明 (1994) : 化学的に見た第四紀火山と熱水系の関係-なぜ高塩濃度と低塩濃度の熱水系が存在するのか-。 *地質学論集*, No. 43, 156-168.
- 高橋正明・村岡洋文・浦井 稔・アズナヴィア ナスティオン (1998) : インドネシア東部島嶼地域の地熱系の予察調査。 *地質ニュース*, no. 521, 54-64.
- 高橋正明・佐藤 努・前川竜男・佐々木宗雄・藤本光一郎・伊藤順一・原山 智・及川輝樹・高橋 康・吉澤杉洋 (2000) : 硫黄沢、地獄谷及び餓鬼谷の温泉水のBr/Cl比について-花崗岩地帯から放出される水-。 *地調報告*, No. 284, 127-132.
- Takahashi, M., Urai, M., Yasukawa, K., Muraoka, H., Matsuda, K., Akasako, H., Koseki, T., Hisatani, K., Kusunadi, D., Sulaeman, B. and Nasution, A. (2002a) : Geochemical characteristics of hot spring waters in Bajawa area, central Flores, Indonesia. *Bull. G. S. J.*, 53, 183-199.
- Takahashi, M., Urai, M., Yasukawa, K., Muraoka, H., Matsuda, K., Akasako, H., Koseki, T., Hisatani, K., Kusunadi, D., Sulaeman, B., Sriwana, T. and Nasution, A. (2002b) : Hydrogen and oxygen isotopic compositions of subsurface waters at Bajawa area, central Flores, Indonesia. *Bull. G. S. J.*, 53, 201-209.
- Yoshida, Y. (1991) : Geochemistry of the Nigorikawa geothermal system, southwest Hokkaido, Japan. *Geochem. J.*, 25, 203-222.

TAKAHASHI Masaaki (2002) : The geochemical research of the Bajawa geothermal field, Flores, Indonesia.

<受付：2002年7月15日>