

屋久島の渇水期における 酸素・水素安定同位体比と水質変化

CHANGES OF HYDROGEN AND OXYGEN STABLE ISOTOPS AND WATER QUALITY OF DRY SEASON IN THE YAKUSHIMA ISLAND

横田恭平¹・井伊博行²・谷口正伸³
Kyohei YOKOTA, Hiroyuki II, Masanobu TANIGUCHI

¹学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930番地)

²正会員 博(理) 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科 (同上)

³正会員 博(工) 和歌山大学助教 システム工学部環境システム学科 (同上)

Oxygen isotopic ratios of river waters in the Yakushima Island show high in the east and low in the west. Especially, oxygen isotopic ratio was extremely low in the west October 2006 when precipitation is the lowest month in the Yakushima Island. Oxygen isotopic ratio increases with precipitation and decreases with distance from seaside. Cl⁻ concentrations in the river water are uniform from March 2006 to February 2007. However, Na⁺ concentration was high and oxygen isotopic ratio was low in dry season, October 2006. Spring water is thought to be high Na⁺ concentration derived from Na⁺ feldspar in granite and low oxygen isotopic ratio derived from rain water in the upper catchment. Therefore, low oxygen isotopic ratio and high Na⁺ concentration river water in the dry season is thought to come from spring water.

Key Words : oxygen isotope, Na⁺, Cl⁻, Na/Cl, spring water, hot spring water, granite

1. はじめに

屋久島は、降水量が多い島であり、また円錐形をなしているため対照的な地形で解析が容易であり、水循環を解明するのに適している¹⁾。酸素安定同位体は、水起源のトレーサとして注目を浴びている²⁾。また、気象学的な応用例として水の蒸発を推定する指標としても注目されている。酸素同位体比は、降水量が多くなると同位体比が低くなり、降水量が少なくなると同位体比が高くなるといわれている。

2006年は全国的に渇水期であり、屋久島も例外なく降水量が少なかった。年間3000mmを越える地域での降水量の減少が河川の水循環にどのような影響を及ぼすのかが明確にされておらず、これを判断するのに、2006年の渇水期の屋久島は最適な環境と考えられる。また屋久島は、世界自然遺産に登録された島で人的影響をあまり受けない場所でもある。そこで人為的汚染の少ない屋久島に関して、水循環の指標となる酸素同位体と水質から、渇水期においてどのような影響が見られるのかを解明する。

2. 現地・分析・調査概要

研究対象地域である屋久島は、図-1に示す。黒丸は、水質調査地点である。人口約14000人の屋久島は、鹿児島県に属し周囲132km、面積約503km²である。中央部には、九州最高峰の宮之浦岳(1925m)が聳え立っている。また、1000mを越える峰は30を越え、洋上のアルプスとも呼ばれている。屋久島は降水量が多く、山間部では8000～10000mmの降水量が観測され、平野部でも3000mmの降水量が観測されている^{3),4)}。屋久島の降水量が多い理由は、海上に孤立した島であるため黒潮により水蒸気を多く含んだ雲がこの屋久島の峰を上昇することによって気温が下がり多量の降水になるためである。そのため、屋久島と同じく黒潮の通り道である標高282mの山が存在する種子島(周囲166km、面積447km²)の降水量は、2000mmと低い値である。

本研究において、降水量は気象庁が観測する2地点の屋久島測候所と尾之間測候所のデータを、雨量は農林水産省林野庁が観測する10地点のデータを使用した^{5),6)}。降水量とは、雨量に雪などの固体の雨も含めた量である。

平均気温は、気象庁のデータを使用した。気象庁の屋久島測候所、尾之間測候所は1938年、1977年からそれぞれ観測を開始している。林野庁の10地点(図-1の数字の地点)は1997年から観測されており、本研究では、年雨量を計測された年のみ使用した。

水質調査・試料採水日は2006年3月、7月、10月と2007年2月の計4回である。調査地点は、河川水・渓流水が主で

ある。対象温泉地は4ヶ所あるが、同一温泉でも泉源ごとに採取し、計10地点で採取した。降水は、7月に関しては調査時に降った雨を採水したが、2007年2月に関しては、2006年10月調査時に採水機を設置し、それを2007年2月に回収したものである。採水サンプルは、研究室に持ち帰り、0.45 μ mのフィルターを通したあと、溶存成分をイオンクロマトグラフィーで分析した。イオンクロマトグラフィーは、(株)日本ダイオネクス社製を使用している。重炭酸イオンに関しては、硫酸滴定により分析を行った。水素・酸素の同位体比は、水素・炭酸ガス平衡法によって前処理を行った後、質量分析装置(Delta plus)で測定した。

3. 屋久島における降水量、雨量と可能蒸発散量

図-2は、気象庁と林野庁による屋久島の年降水量、年雨量そして標高である。屋久島の年平均降水量は、標高1380m地点で最大9775mmであり、標高1800m地点では5554mmと標高が高くなると年雨量が多くなるとはいえない。年雨量が最も多かったのは、1999年の地点6(南東)に対する11718mmである。さらに標高5~40m付近でも約3500~4500mmの年雨量がある。西側の地点5、8の年平均雨量は、5863、3352mmであるが、東側のほぼ同じ標高の地点4、10の年間降水量は、8538、9160mmとは異なる。そのため、東側のほうが雨量の多い傾向にある。

図-3は、屋久島測候所と尾之間測候所で観測された2006年3月~2007年2月の月降水量とThornthwaite法により求めた可能蒸発散量である。可能蒸発散量を求める代表的な方法として、Thornthwaite法がある⁷⁾。Thornthwaite法(1)を用いて屋久島測候所と尾之間測候所

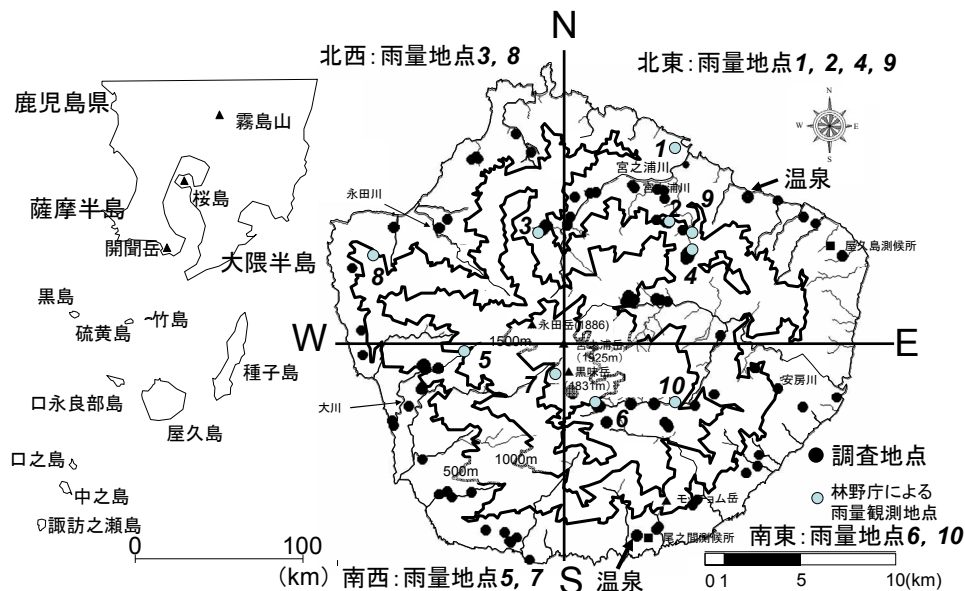


図-1 調査対象地域 (左:周辺図, 右:屋久島研究対象地)

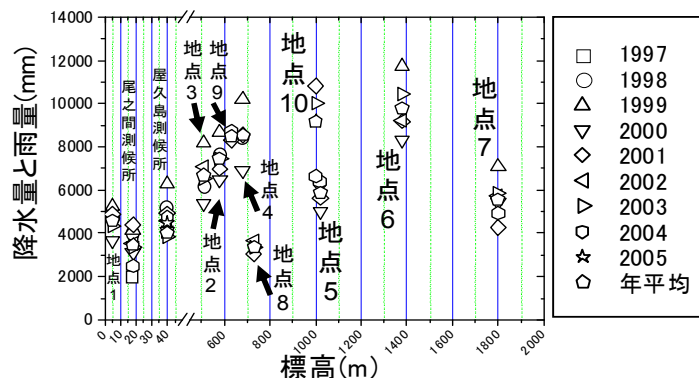


図-2 屋久島での降水量(気象庁)と雨量(林野庁)について

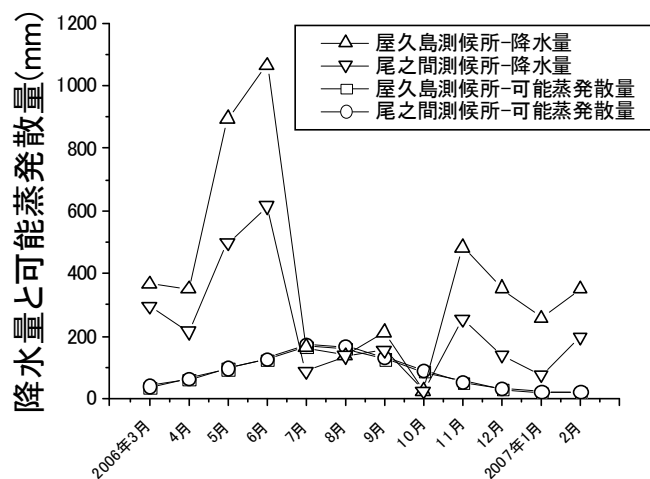


図-3 屋久島での降水量と可能蒸発散量

での可能蒸発散量を求めた。Tj(各月の平均気温)は気象庁、Do(可照時間)は水理公式集⁸⁾のデータを利用した。

Thornthwaiteの式 (1)

$$J = \sum (t_j / 5)^{1.514}$$

$$a = 0.000000675J^3 - 0.0000771J^2 + 0.01792J + 0.49293$$

$$E_p = 0.533D_o(10t_j / J)a$$

E_p : 月平均蒸発散能, T_j : 各月の平均気温,

D_o : 日照時間 (12h/dayを1とする)

降水量と可能蒸発散量との関係は、7、8月を除きすべて降水量が多い傾向にあった。月降水量が少ないのは、10月の24、25mmである。この数値は、観測史上最も少ない月降水量であった。月可能蒸発散量は、7月が最も高く、1、2月が低い結果を示した。2006年10月の可能蒸発散量は約90mmで、両測候所の月降水量の24、25mmより高いことがわかる。他の期間は、尾之間での7月の降水量86mm、可能蒸発散量170mmを除き可能蒸発散量より降水量が多いかほぼ同じ結果となっている。そこで、本研究では、10月を渇水期とし、その他の季節で酸素同位体比と水質にどのような違いがあるのかを解明する。

4. 屋久島における酸素同位体比

水素・酸素同位体比は、水起源のトレーサとして利用されている⁹⁾。図-4は、2006年3月～2007年2月の酸素同位体比の平面分布である。島全体の特徴として、酸素同位体比が南東から東側が-6.5～-5.0‰で、西から北西は-7.5～-6.5‰で推移していた。また、南は-7.7～-6.5‰付近であるが、北は-6.5～-6.0‰の値を示した。そのため、南東から北は、酸素同位体比が高い傾向を示し、北西から南は低い傾向を示した。また、内陸に行くほど酸素同位体比は低くなる傾向にある。2006年7、10月は、内陸から西にかけて同位体比が-7.7～-7.0‰と低い値を示し、2006年3月、2007年2月の傾向と異なった。図-5は水素同位体比と酸素同位体比との関係である。天水線 ($\delta D = 8 \times \delta^{18}O + d$) においてd値に幅があるので、1つの直線上にはないが、季節ごとにみるとほぼ1つの直線上にある。水素同位体比は、-46～-22‰、酸素同位体比は-7.7～-5.2‰で推移しており、2006年10月のサンプルは酸素同位体比が高く、2006年7月は低い傾向にあるといえる。温泉の同位体比は、水素が-37.5‰、酸素が-7.2‰であった^{10),11)}。

屋久島の降水量は東が多く、西が少ない傾向にあった。酸素同位体比は、東から南が高く、西から北にかけて低くなる傾向にあった。また、水素・酸素同位体比の関係から屋久島の河川水・湧水・温泉水は、季節ごとに傾き8の直線上にあるため、蒸発は少なく、火山起源の水を含まないことから、降水が起源であると推定できた。降水量が多い場所では同位体比は高くなり、降水量が少ない場所では同位体比が低くなる傾向にあった。しかし、

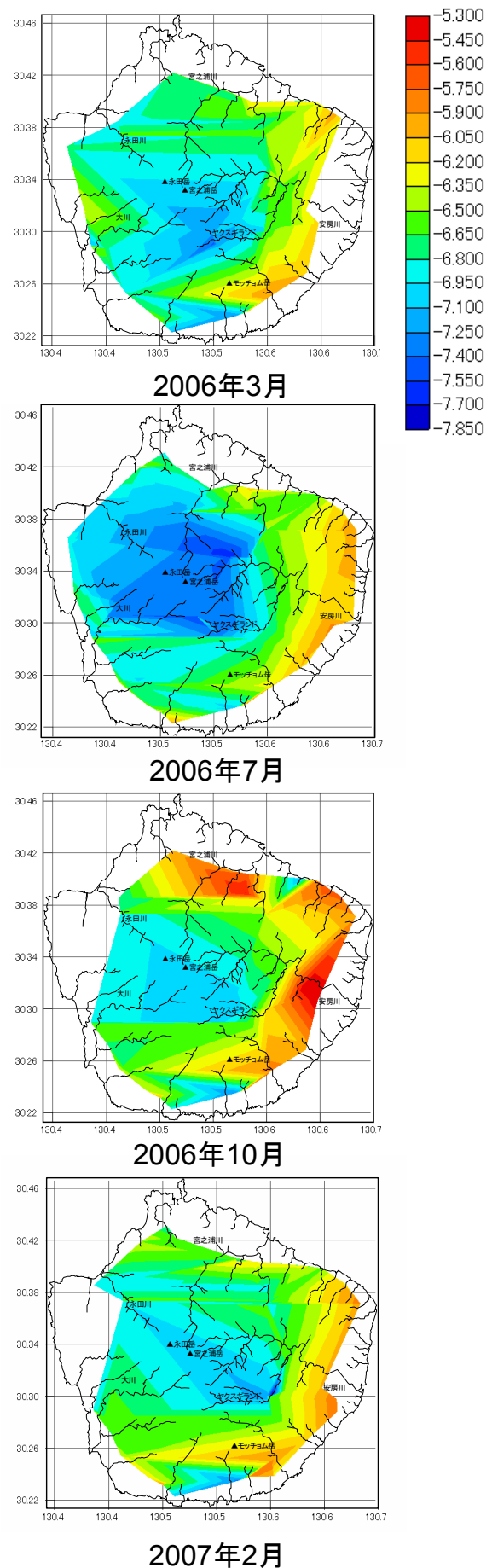


図-4 酸素同位体比の平面分布

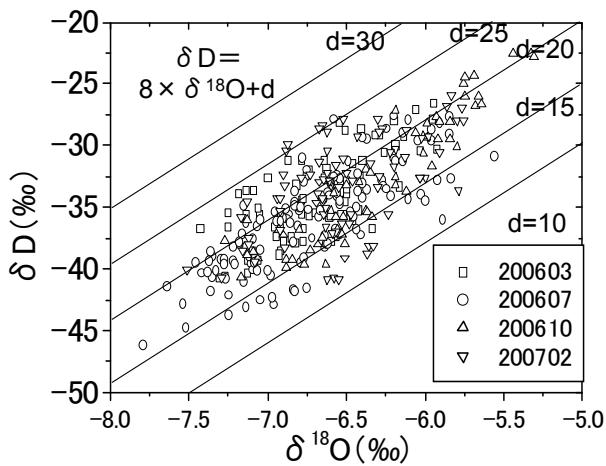


図-5 水素と酸素同位体比との関係

内陸部である標高1380m付近では、年間降水量が9775mmで酸素同位体は-7‰と低い値を示したことから、沿岸部と異なり、降水量が増加すると同位体比は低くなると考えられる。

5. 屋久島の水質について

各種水質では、 Na^+ 、 Cl^- 、主要イオン濃度について示した。2006年10月は降水量が24、25mmと少なかったため、蒸発や海水(NaCl)の影響を受けている可能性がある。図-6、7は、2006年3、7、10月、2007年2月の Na^+ 、 Cl^- の結果を内陸部、北東～南東部、南～南西部、北西部に分けたものである。2006年10月の Na^+ の値は、すべての地点において他の時期に比べて増加傾向にあり、最大で3mg/l異なる地点が存在した。 Cl^- 濃度は、2007年2月が多くて高い傾向を示した。図-3の降水量と可能蒸発散量の結果より、2006年10月は、降水量より可能蒸発散量の方が多いことから、他の降水量が多い季節より全溶存イオン濃度は高くなると推定できる。渇水期の10月は、 Na^+ は増加しているが、 Cl^- の値は大きく変化していない。

Cl^- 濃度は、化学的に安定した物質で、一般に岩石と反応することがないため、海水の浸入や人為的汚染や蒸発がないかぎり、濃度が変化することがない。地下水は蒸発が極めて少なく、ほかからの供給がない限り濃度が変化することは少ない。そこで屋久島の地下水での水質変化を確認するため、 Cl^- 濃度がほぼ等しい河川水を選び各種濃度を比較した。図-8は温泉水の Cl^- 濃度とほぼ同じ濃度の河川水の各種濃度と温泉水の各種平均濃度である。温泉水は河川水に比べ、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} の濃度は増加しているが、 Mg^{2+} 濃度は減少している。そのため、地下水は、河川水に比較して Na^+ 濃度が増加するといえる。

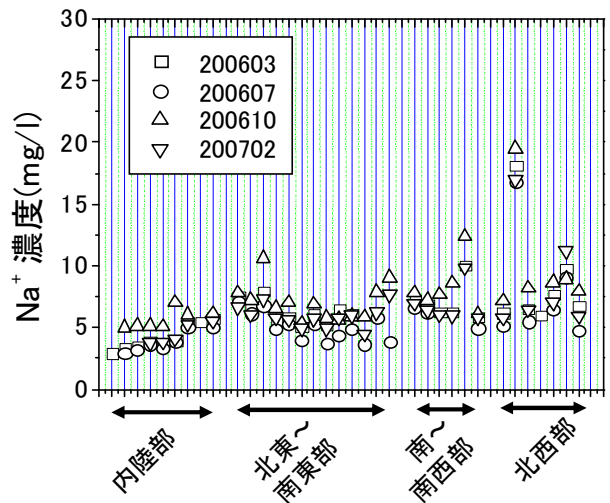


図-6 各地点の Na^+ 濃度の年間変化

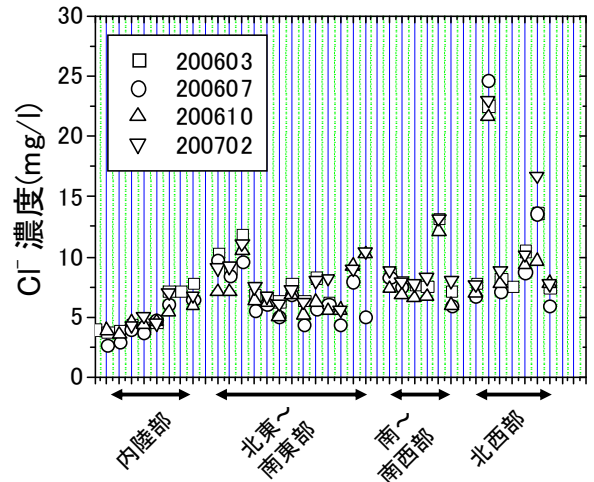


図-7 各地点の Cl^- 濃度の年間変化

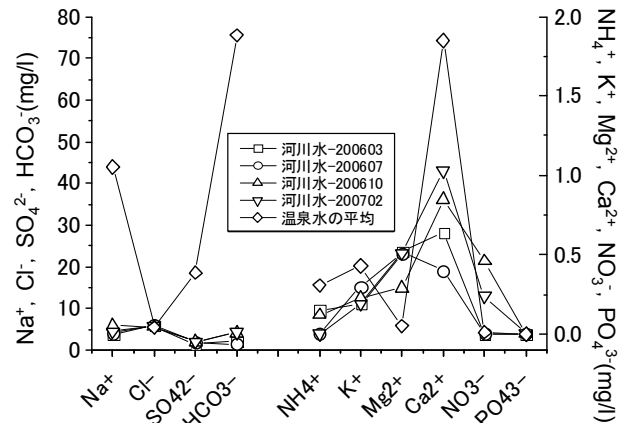


図-8 屋久島における河川水と温泉水の各種濃度

6. Na/Cl 比について

水質の年間変化において、 Cl^- 濃度には大きな変化がないが、 Na^+ に変化があることがわかった。特に2006年10月の降水量の屋久島観測史上最も少ない月は、顕著であった。そこで、本研究では降水量が少ない状態と平常並みの降水量との水質比較を行った。また温泉水が河川水に比べて Na^+ 濃度が高い傾向を示したため、2006年10月における河川水の Na^+ 濃度の増加は、地下水の影響によるものか考察する。主成分が NaCl の海水の影響を見る

ため、図-9にNa/Cl比の平面分布を示す。Na/Cl比の最大値は1.8で、最小値は0.5である。2006年3月と2007年2月は、一部を除き最大値と最小値の差は0.5～1.0であったが、2006年7月は0.5～1.8、10月は0.5～1.5の差が存在した。おもに西部と内陸部に高い値が存在する。2006年7月の1.8のような特異点を除けば、Na/Cl比の差が最も高い傾向にあるのは2006年10月の1.5であった。2006年10月から2007年2月まで降雨採水のため採水機を設置し6個のサンプルを得たが、降水のNa/Cl比結果は0.5～0.6である。生活排水のNa/Cl比は、生活排水の主要物質がNaClとするとNa/Cl比は0.64($\text{Na}^+=22.9/\text{Cl}^-=35.4$)である¹²⁾。温泉水のNa/Cl比は、図-8の結果から8.2である。

図-7からは、Clが顕著に変化する地点は存在しない¹³⁾。そこで、Na/Cl比が増加した原因は、 Na^+ の濃度が変化したことになるがその変化の理由を解明する。濃度変化として考えられるのは、①蒸発による濃縮、②家庭・工業排水・降雨の流入、③岩石から溶解した成分を含む水の流入がある。①蒸発による濃縮について考察する。図-5に水素・酸素同位体比の関係を示した。水素・酸素同位体比は蒸発があると傾き8より小さくなることが知られている。最も降水量の少なかった2006年10月においては、傾き8の天水線 $\delta D=8 \times \delta^{18}\text{O}+d$ でほぼ $d=15\sim 20$ の間にあるため蒸発の影響は無視できる。さらに蒸発が起こってもNa/Clは変化することはない。②家庭・工業排水の流入については、屋久島は世界遺産登録されていることから、工業排水の混入は考えにくい。生活排水は、主成分がNaClであるためNa/Cl比は約0.64にあると推測できるのでNa/Cl比が1.8になることは考えにくい。降雨の流入についてであるが、そのNa/Cl比は0.5～0.6で推移しているため、 Na^+ が増加した要因としては考えにくい。③岩石との反応について考察する。屋久島において岩石と反応すると水質がどのように変化するかを見ていく。温泉水は河川水・溪流水と比較して Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ が増加した。 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ の増加要因は、屋久島の地質がほぼ花崗岩で鉱物組成が石英(SiO_2)、長石($(\text{Na}, \text{Ca}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$)で占められており、その岩石成分が溶解したことが考えられる¹⁴⁾。以下に Na^+ に富む花崗岩の反応式(2)である。

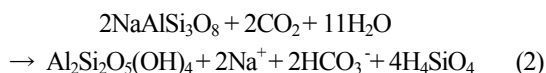
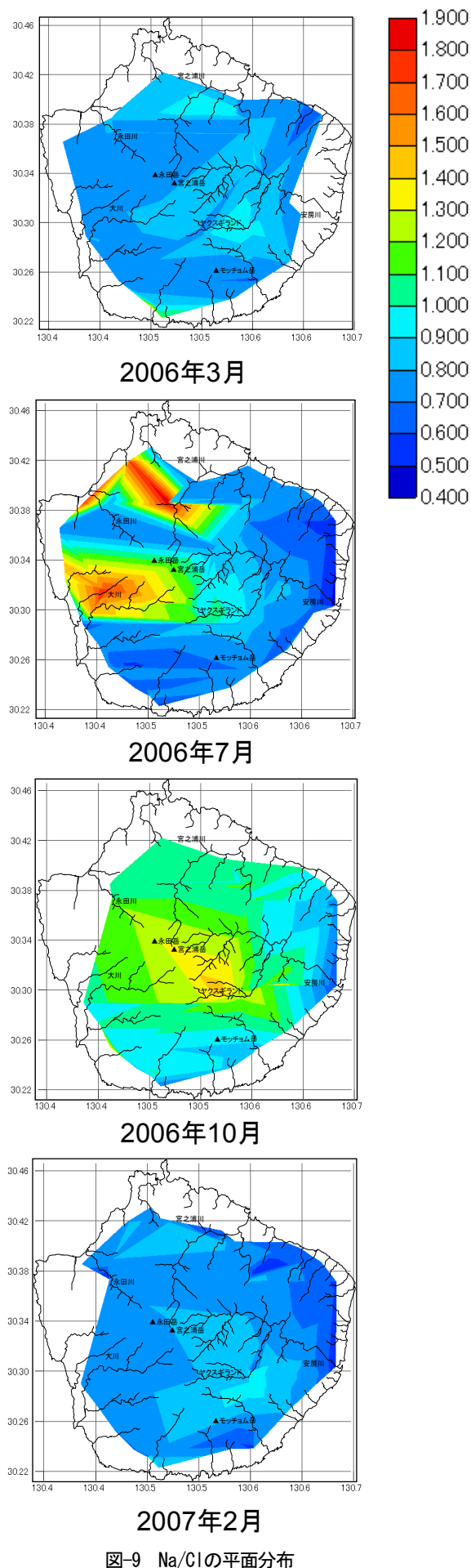


図-8の結果から温泉水は、河川水に比べて Na^+ 濃度が約10～14倍多いことがわかる。そのため2006年7、10月にNa/Cl比が1.5、1.8と最も高い数値を示したのは、温泉水と組成が似た湧水の割合が増加し、 Na^+ が変化したと考えられる。このNa/Clが高い値を示した西側の地域は、



東側より降水量が少ない地域である。そこで、他の季節と違いNa/Cl比が1.8を示した理由としては、2006年7、10月は降水量が少ないため、湧水の割合が多くなりNa⁺濃度が増加したと考えられる。

以上のことから図-5の2006年3月～2007年2月の計4回における酸素安定同位体比の結果は、-7.7～-5.5‰の範囲で変化し、東側が高く、西側は低い結果を示し、特に2006年10月はそのばらつきが顕著であった。ばらつきの原因は、図-4の水素・酸素同位体比から蒸発でないと推定できる。図-6のNa⁺における年間変化から、2006年10月のNa⁺濃度は高い傾向を示したが、図-7のCl濃度は大きな変化はなかった。10月のNa/Clの結果は、東側が0.6～1.1と低く、西側が1.5や1.8と高い傾向を示した。西側のNa⁺濃度が高く、酸素同位体比が低いという特徴は、湧水のNa⁺濃度が高く、酸素同位体比はその場所よりもより標高の高い地点から由来するため低くなる傾向と一致する。降水量は東側が多く、西側が少ない傾向にあったことから、西側は湧水の割合が多くなると考えられる。

7. まとめ

本研究では、屋久島の渇水期において、酸素同位体比、Na/Cl比がどのように変化するかを考察した。本研究をまとめた断面模式図が図-10である。山頂からみて右側が降雨の少ない時期、左側が多い時期を示しており、内側が内陸部、外側が沿岸部を示している。内陸部は降水量にかかわらず、河川水・湧水の酸素同位体比、Na/Cl比はほぼ同じ傾向を示したが、沿岸部では、降水量の多少により異なる傾向を示した。

屋久島の酸素同位体比は、東側で高く、西側で低い傾向を示した。特に2006年10月の西部では、酸素同位体比が低い傾向を示した。2006年10月は、1938年、1977年からの屋久島・尾之間気象庁観測以来最も降水量が少ない月であった。酸素同位体比との結果から、同位体比が高い場所では降水量が多く、低い場所では降水量が少ない傾向にあった。しかし、内陸部においては、酸素同位体比は低くなった。内陸部の年平均降水量が屋久島内で一番降水量が多い場所である。

2006年3、7、10月、2007年2月のCl濃度の結果をみると、大きな季節変化はなかった。Na/Cl比を見ると全体的に1.0の値を示したが、2006年7、10月の西側では、1.5、1.8という大きな値を示した。渇水期の2006年10月では、河川水のNa⁺濃度、Na/Cl比は高くなり、酸素同位体比は低かった。湧水は風化花崗岩中のNa長石との反応で、Na⁺濃度、Na/Cl比が高く、採水地点よりも上流で地下に浸透しているので、同位体比は低い。したがって、屋久島における渇水期の河川水は、湧水の混入割合が高いと考えられる。

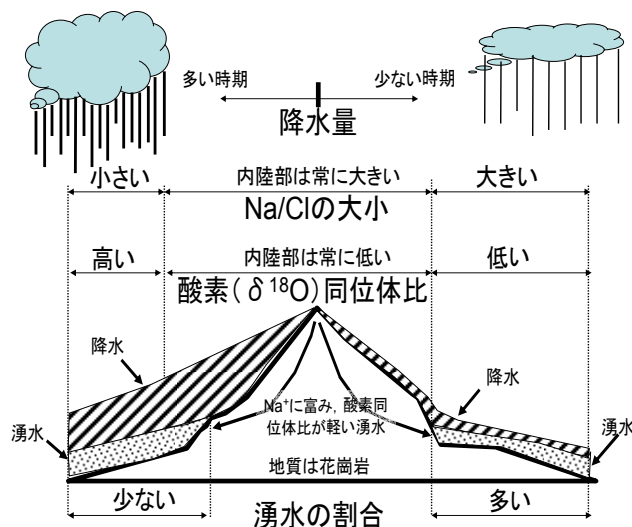


図-10 本研究のまとめ(屋久島の断面模式図)

参考文献

- 1) Julian E. Andrews, Peter Brimblecome, Tim D. jickells, Peter S. Liss : 地球環境化学入門, Springer-Verlag Tokyo, pp.10-11, 2001.
- 2) 横田恭平, 井伊博行, 谷口正伸, 平田健正 : 水素・酸素同位体を用いた屋久島における温泉水の起源推定, 水工学論文集, 第51巻, pp.475-481, 2006.
- 3) 高原宏明, 松本淳 : 屋久島の降水量分布に関する気候学的研究, 地学雑誌, 111 (5), pp726-746. 2002.
- 4) (財) 屋久島環境文化財団 : 図説屋久島, 鹿児島県環境生活部環境保護課, pp18-21, 2005.
- 5) 気象庁ホームページ : <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>.
- 6) 林野庁ホームページ : <http://www.kysyo-shinrin.jp/keikaku/yakushima-sekaiisan/yakushima-sekaiisan.html>.
- 7) 中川慎治 : 蒸発散の概念と推定法の適用条件, ハイドロロジー, 第26巻, 第1号, pp43-48, 1996.
- 8) 水理公式集, 昭和46年版, pp.111-112.
- 9) 馬原保典, 中田英二, 大山隆弘, 宮川公雄, 五十嵐敏文, 市原義久, 松本裕之 : 化石海水の同定法の提案-太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価-, 地下水学会誌, 第48巻第1号, pp.17-33, 2006.
- 10) 水谷義彦, 吉田健治 : 同位体比から見た富山県の温泉起源, 温泉学会, 第41巻, pp.116-125, 1991.
- 11) 町田功, 近藤昭彦 : わが国の天然水における酸素・水素安定同位体比-環境同位体データベースを用いた解析-, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.5, 2003.
- 12) 横田恭平, 井伊博行, 養父志乃夫, 平田健正 : 大阪府南部の生活排水が流入する河川におけるヤゴの生物生息限界について, 水工学論文集, 第50巻, pp.1105-1110, 2006.
- 13) 鈴木啓助 : 降水過程と化学物質循環, 日本水文科学会誌, 第27巻, 第4号, pp.185-195, 1997.
- 14) 佐々木宗建 : 花崗岩地域の地下水の地化学的特徴, 地質調査研究報告, 第55巻, 第11/12号, pp.439-446, 2004.

(2007.9.30受付)