

地表水の安定同位体比の空間分布に与える 地形効果の解明

— 重回帰分析を用いた検討 —

TOPOGRAPHY EFFECT ON SPATIAL DISTRIBUTION OF STABLE ISOTOPE RATIOS OF SURFACE WATER - MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS -

石塚正秀¹・曾根由実²・井伊博行³・平田健正⁴

Masahide ISHIZUKA, Yumi SONE, Hiroyuki II and Tatemasa HIRATA

¹正会員 博(工) 和歌山大学助手 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930)

²学生会員 和歌山大学大学院 システム工学専攻 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930)

³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 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930)

⁴正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930)

Here we measured oxygen isotope ratios of surface water in Wakayama Prefecture and showed their spatial distribution. The heavy isotopes were distributed in the southern area of the prefecture, while the light isotopes were in the northern inland area. The characteristics of isotope distribution were influenced by various topography effects such as latitude effect, inland effect and altitude effect. In the present study, multiple regression analysis was carried out to understand how much topography effect affects on the isotopic spatial distribution. The most effective one was a latitude effect and its ratio was 45 % for oxygen isotopes ratio distribution. Inland effect and altitude one are 28 % and 27%, respectively. The prediction by the multiple regression equation showed well the topography effect. However, other effect such as vapor movement and rain on the spatial distribution must be considered to clarify isotopic variation processes.

Key Words : stable isotope, topography effect, multiple regression analysis, spatial distribution, surface water

1. 序論

水循環解明の研究において従来まで利用されてきたトレースには、電気伝導度や硝酸イオンなどの溶存化学成分^{1) 2)}やトリチウム³⁾がある。しかし、前者は地質や排水の影響により濃度が変化するために、降雨後の山地流域における流出解析に限られたものであり、後者は放射崩壊性の同位体であるために、近年では自然中での濃度が著しく低下している。

一方、水の安定同位体は降雨後に濃度変化しにくく、また、安定的に存在するため、水蒸気や雨雲の移動を含めた水(H₂O)の輸送を知ることができる。安定同位体は相変化の際に同位体分別効果に基づいて分離・濃縮するため、地表水の同位体比は雨滴や水蒸気の移流・拡

散により、空間的に大きく変動する。このような変化が生じる要因として、緯度、海岸からの距離、標高による地形効果の影響が知られている^{4) 5)}。しかし、これら地形的特徴は同位体比の空間分布に複合的に影響を与えていると考えられるが、このことについて定量的に検討された研究はない。

そこで、本研究では、和歌山県内の地表水を採水し、水素・酸素安定同位体比の空間分布特性を調べた。そして、地形効果が同位体比の空間分布に与える影響について定量的な解析を行い、同位体比の空間分布の特徴を明らかにする。

2. 調査の概要

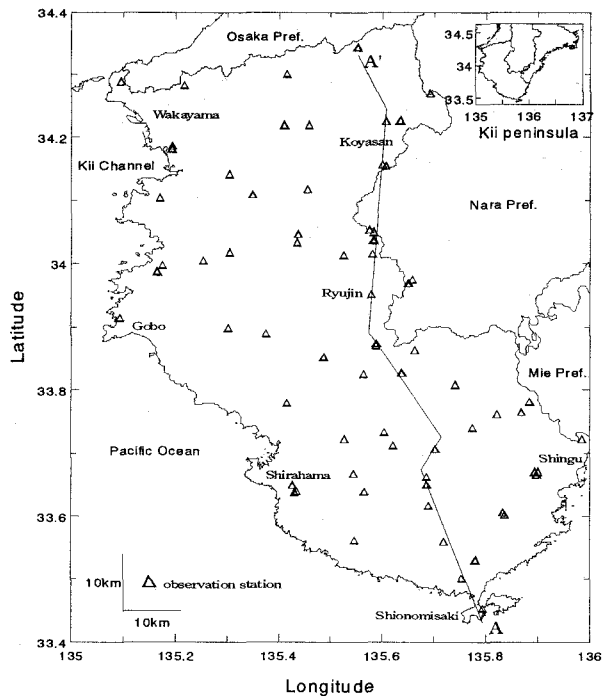


図-1 観測地点

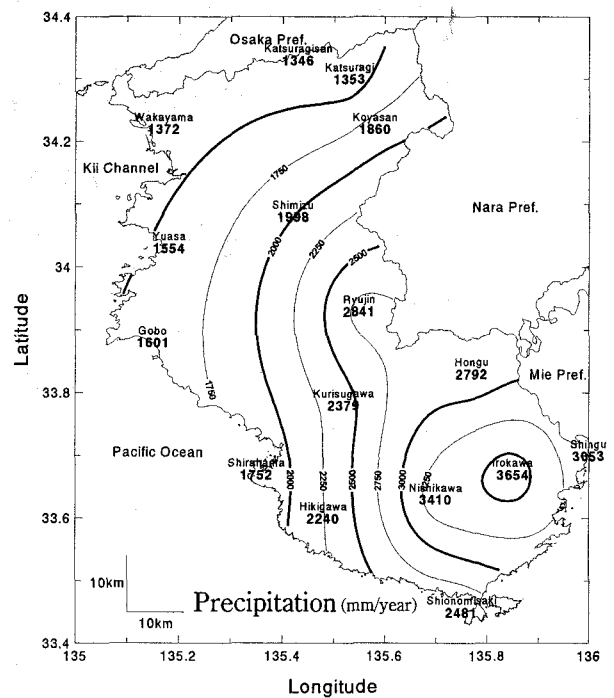


図-3 和歌山県における年降水量の空間分布
(AMeDAS観測データ, 1991~1999年の平均値)

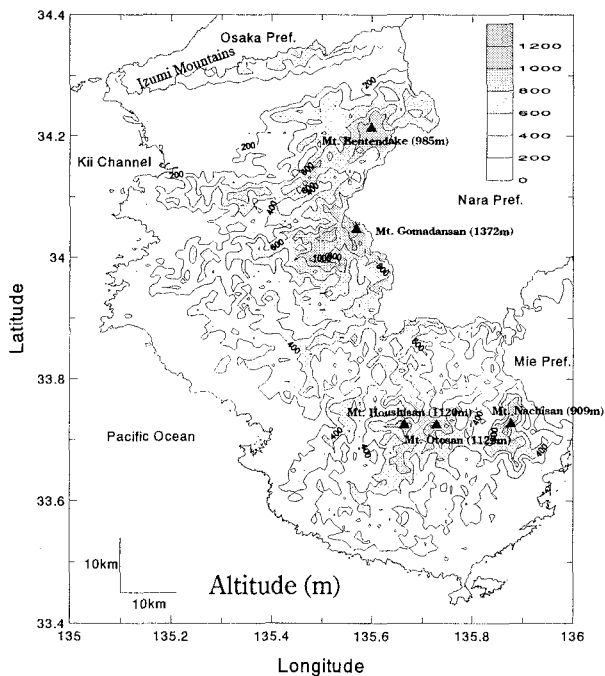


図-2 和歌山県における標高分布
(国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)より)

調査は2001年4月~7月に数回に分けて実施した。本調査では、空間分布特性を詳細に把握する必要があることから、県全域において渓流水を採水した。採水はできる限り上流において行い、観測地点周辺における局所性

を有する水で、かつ、人為的影響を受けていない水を採取した。図-1は観測地点(全76地点)を示す。

水素・酸素安定同位体比は安定同位体比測定用質量分析装置(Finnigan Mat社製、サーモクエストDELTA PLUS)により測定した。

3. 和歌山県の地形・降水量特性

(1) 標高分布

図-2は標高分布を示す。和歌山県は吉野杉の生産をはじめとして林業が盛んであり、森林地帯が多く、林野面積は県面積の77%を占める⁶⁾。また、県東部は紀伊山系に属し、和歌山県の最高峰である護摩壇山(1372m)は県中東部に位置する。その北側には高野山(約900m)、南側には龍神(約700m)がある。また、県南部には大塔山(1122m)、法師山(1120m)などの1000mを越える山がある。大阪府と和歌山県の県境に位置する和泉山地の標高は約400~900mである。

(2) 降雨特性

図-3は1991~1999年における年総降水量の平均値の空間分布を示す。雨量データには気象庁のAMeDASデータを用いた。和歌山県内には観測地点が全19地点あり、このうち年間を通して観測が行われている16地点に関して、欠測の無い1991年から1999年までの観測結果を

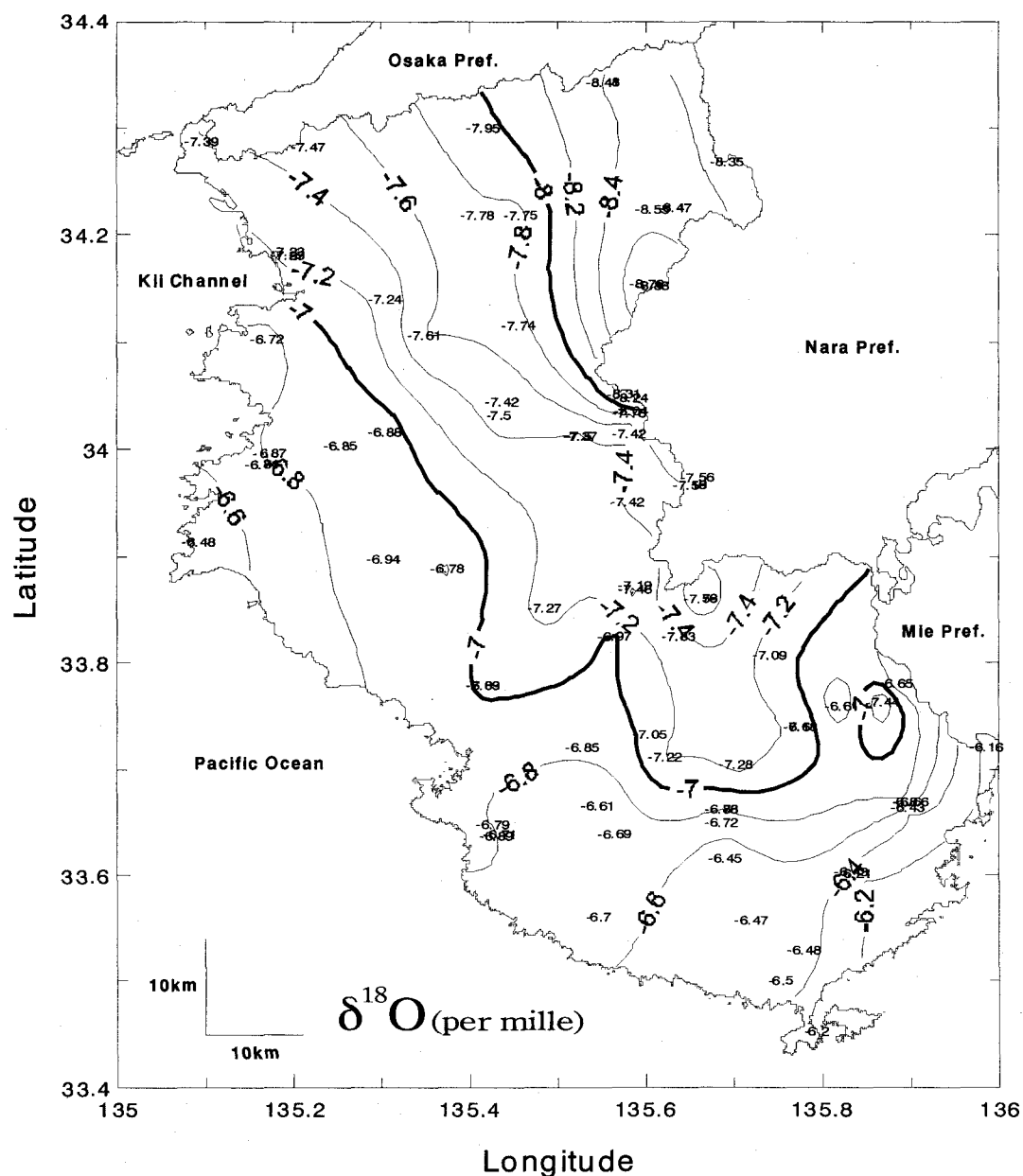


図-4 和歌山県における地表水の酸素同位体比の空間分布

用いた。紀伊半島の南東地域は多雨地帯であり、色川・西川・新宮において年降水量は3000mm/yrを越えている。紀伊半島中央部に位置する龍神・本宮地域では2500mm/yr以上の降水量が観測されている。また、降水量は県南東部から北西方向に向けて徐々に減少しており、和歌山市における降水量は1372mm/yrである。

4. 酸素同位体比の空間分布特性

(1) 同位体比と地形特性

図-4 は和歌山県における地表水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の空間分布を示す。最も重い同位体比が観測された地点は新宮市であり、酸素同位体比は-6.16‰、水素同

位体比は-34.7‰である。県南東部は同位体比が大きく、地形的特徴としては、緯度が低く、標高が低く、海岸に近く、降水量が多い地域である。一方、最も軽い水は高野山に分布し、酸素同位体比は-8.77‰、水素同位体比は-57.4‰である。高野山は県北東部に位置しており、緯度が高く、標高が高く、内陸に位置する地形的特徴がある。

全体的特徴として、海岸に近いほど同位体比が重く、内陸に向かうにつれて同位体比は徐々に軽くなり、内陸効果の影響が表れている。それと同時に、標高が高くなるにつれて、同位体比が軽くなる高度効果もみられる。

和歌山県内で標高の最も高い護摩壇山では、高野山よりも重い水が分布しており、標高と同位体比の変化が一致しない場合もある。この理由として、高野山は護摩壇

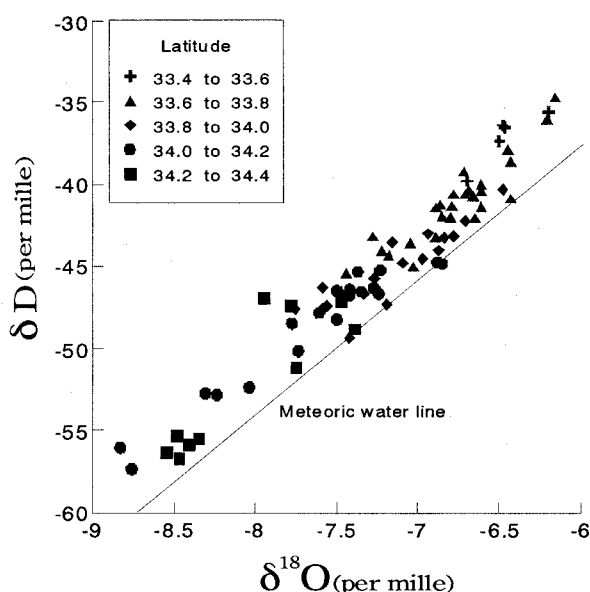


図-5 酸素同位体比と水素同位体比の関係

山の北側に位置し、緯度の違いや内陸効果・雨陰効果が同位体比の空間分布に影響を与えていると考えられ、地形効果が複雑に作用していることが分かる。ここで、雨陰効果とは、雨雲移動の風上側では同位体比が重く、風下側では軽くなる効果である。同様の変化は大塔山においてもみられ、山地の北側と南側では同位体比の分布形状が異なる。

(2) 同位体比と降水量との関係

これまでの研究により、降水量が多い地域は同位体比が軽いことが雨量効果として知られているが⁴⁾、降水量分布(図-3 参照)と同位体比との明瞭な関係はなく、新宮、色川、潮岬においては逆の特性を示す結果が得られた。降水量が多い和歌山県(紀伊半島南東部)における特徴と考えられるが、この原因は明らかでない。

(3) 酸素同位体比と水素同位体比の関係

水素同位体比は酸素同位体比と線形関係(天水線: δ

$D = 8 * \delta^{18}O + 10$)にあることが知られている⁷⁾。本調査により得られた同位体比を緯度毎に分類した結果を図-5に示す。水素同位体比と酸素同位体比の関係は、 $\delta D = 8 * \delta^{18}O + 12.7$ ($R=0.96$)であり、 δD は $\delta^{18}O$ と同様に緯度毎に変化していることが分かる。この結果から、採水された渓流水は各地域の局所性を代表するといえる。

5. 地形効果と同位体比との関係

4章では、地表水の同位体比の分布特性を決定する要因として緯度効果、内陸効果、高度効果、雨陰効果を示した。しかし、実際にはそれらが複合的に影響していることから、ここではいずれの効果が同位体比の分布特性に影響を与えているのかについて定量的な考察を行う。

(1) 相関解析

図-6は酸素同位体比と標高、緯度、海岸からの距離との関係、表-1はそれらの相関係数を示す。ここで、降水量についてはAMeDAS観測地点(16地点)に最も近い調査地点のデータを用いた。また、海岸からの距離は観測地点からの同心円が海岸線と交差するときの最小半径とした。解析結果から、酸素同位体比および水素同位体比はともに、海岸からの距離、標高、緯度との相関が高く(0.7以上)、地形特性との関連性が高いことが示された。一方、同位体比と降水量との相関係数は低く(0.5以下)、雨量効果はみられない。

一般に、高度効果として中緯度では標高が100m高くな

表-1 酸素・水素同位体比との相関係数

	海岸からの距離	標高	緯度	降水量*	$\delta^{18}O$	δD
海岸からの距離	1	0.84	0.45	0.02	-0.79	-0.75
標高		1	0.39	-0.08	-0.76	-0.71
緯度			1	0.65	-0.78	-0.82
降水量*				1	0.46	0.47
$\delta^{18}O$					1	0.96
δD						1

*降水量はAMeDASデータ(16地点)を用いた。

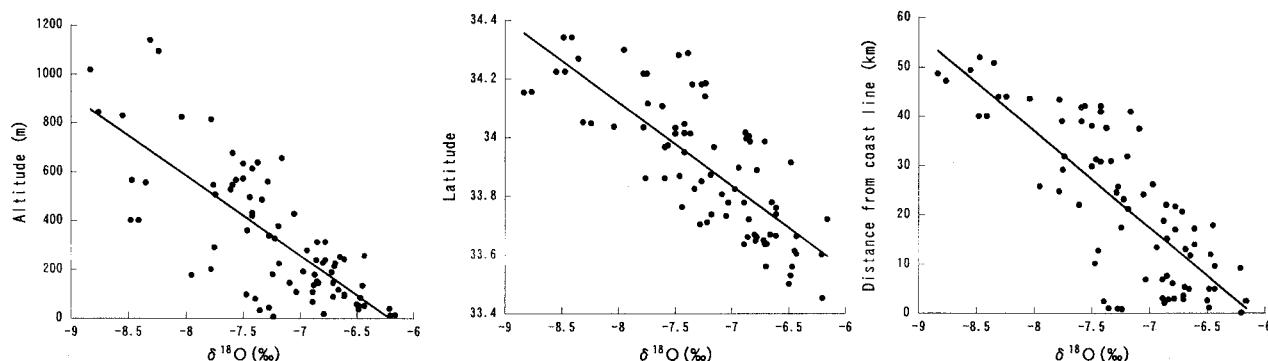


図-6 酸素同位体比と標高、緯度、海岸からの距離との関係

る毎に酸素同位体比は-0.15~-0.4‰減少することが知られているが⁵⁾，単回帰的にみると本調査では-0.18‰/100mであった。同様に，緯度効果は-0.21‰/0.1°，内陸効果は-0.32‰/10kmであった。

(2) 重回帰分析

つぎに，地形特性と同位体比の複合的な影響を定量化するために，つぎのような線形回帰モデルを考え，重回帰分析を行った。

$$\delta^{18}O(x, y, t) = \sum_{n=1}^n f_n(x, y, t) + C$$

ここで， x は経度方向位置， y は緯度方向位置， f_n は同位体比に影響を与える項， n は項数（=3）， C は定数項を表す。目的変数は酸素同位体比，説明変数は標高，緯度，海岸からの距離とした。なお，降水量は同位体比との相関係数が低いため，説明変数として用いなかった。以下に，得られた重回帰式を示す。

$$\delta^{18}O(x, y) = -0.0007A(x, y) - 0.013I(x, y) - 1.372L(y) + 39.8$$

ここで， A は標高（m）， I は海岸からの距離（km）， L は緯度（度）である。なお，自由度修正済み決定係数は0.86であり，解析結果は有意水準0.01のF検定を満たす。標高に対する標準偏回帰係数は-0.30，海岸からの距離に対しては-0.31，緯度に対しては-0.50であった。したがって，地表水の同位体比の分布に最も影響を与える地形効果として，緯度効果が45%，つぎに内陸効果が28%，高度効果が27%である結果が得られた。

また，全調査地点の海岸からの距離 I と標高 A とは相関係数がみられ，その関係式は，

$$A = 15I + 22$$

であった。つまり，高度効果には内陸効果による影響が同時に含まれていることが分かる。この一次直線の傾き

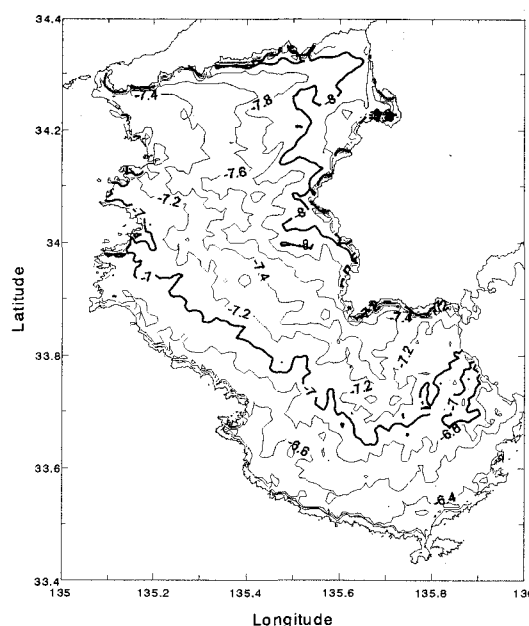


図-7 重回帰モデルによる酸素同位体比の分布予測

および y 切片は対象とする地域の地形特性により異なるため，高度効果の影響は対象地域ごとに違った割合になることに注意する必要がある。既往の研究における標高による同位体比変化のばらつきの原因と考えられる。

6. 重回帰モデルによる同位体比分布の予測

観測地点は不等間隔に分布するため，観測地点以外の同位体比の空間分布を予測するためには，地形特性を考慮して考える必要がある。そこで，5章で求めた重回帰式を用いて，等間隔（ $x=0.01^\circ$ ， $y=0.01^\circ$ ）に100個×100個配置した目的変数をもとに酸素同位体比の予測を行った（図-7 参照）。その結果，地形特性に応じた同位体比の分布形状が得られた。

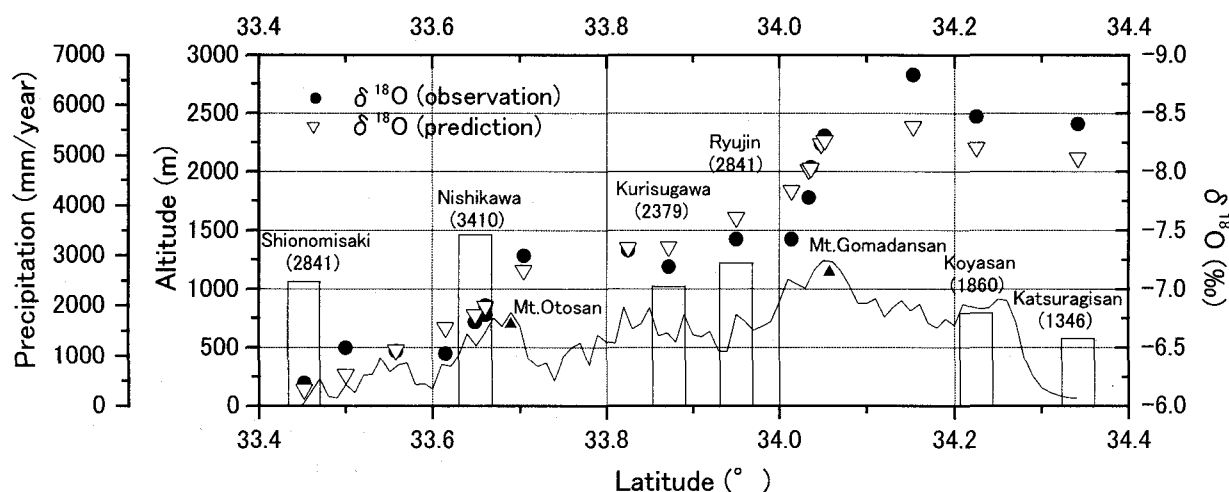


図-8 A-A'線（図-1中）における酸素同位体比の変化および実測値と予測値の比較

図-8 は図-1 中のA-A'線における酸素同位体比の縦断分布を示す。なお、図には標高、年総降水量もあわせて示す。潮岬から大塔山にかけて、県南部地域は降水量が多く、緯度が高くなると共に標高および海岸からの距離も増加するため、地表水の同位体比は徐々に軽くなっている。また、大塔山および護摩壇山の南側から山頂にかけてはそれぞれ同位体比の変化の割合が大きくなっており、高度効果の影響が強く表れている。

一方、大塔山および護摩壇山の北側における同位体比の変化の特徴はそれぞれ異なる。大塔山の北側では同位体比の変化が緩やかであるのに対して、護摩壇山の北側では同位体比が急激に軽くなる傾向がみられる。このことは、護摩壇山の北側地域は紀伊山地の中央付近に位置しており、北部地域では降水量が少なく、南から北への雨雲移動が卓越する県南部地域に対して雨水の供給過程が異なることが考えられる。

つぎに、重回帰モデルによる予測値の空間的な特徴を調べるため、実測結果との比較を行った。実測結果の空間補間には、地球統計学分野で広く一般的に利用されているKriging法を用いた。図-9 は重回帰式による酸素同位体比の実測結果（図-4 参照）と予測結果との偏差 Δ_E を示す。

$$\Delta_E(x, y) = \delta^{18}O_k(x, y) - \delta^{18}O_m(x, y)$$

ここで、 $\delta^{18}O_k$ は実測結果をKriging法により補間した酸素同位体比、 $\delta^{18}O_m$ は重回帰分析により得られた予測値である。この図から、県中部地域では偏差 Δ_E が正の値を示しており、予測結果が過小評価（同位体比が軽く見積もられる結果）となった。一方、高野山のある県北部内陸地域では、予測結果が過大評価となり、同位体比が重く見積もられる結果となった。このような誤差分布が得られた理由として、緯度、標高、海岸からの距離、以外の要因が渓流水の同位体比に影響を与えることが考えられる。例えば、時間変化を含めた降水過程も同位体比の変化に影響を与えることから、他の要因を考慮する必要がある。

6. 結論

本研究では、渓流水の水素・酸素同位体比を分析し、その空間分布特性から緯度効果、内陸効果、高度効果、雨陰効果、雨量効果の影響について考察した。その結果、緯度、標高、海岸からの距離と同位体比との関係がみられたのに対して、降水量との関係はみられなかった。

つぎに、同位体比分布に与える地形効果を定量的に明らかにするために重回帰分析を行った。その結果、和歌山県の地表水の同位体分布に影響を与える効果として、緯度効果の影響が最も強いことが明らかとなった。また、得られた重回帰式を用いて、同位体比の空間分布を予測

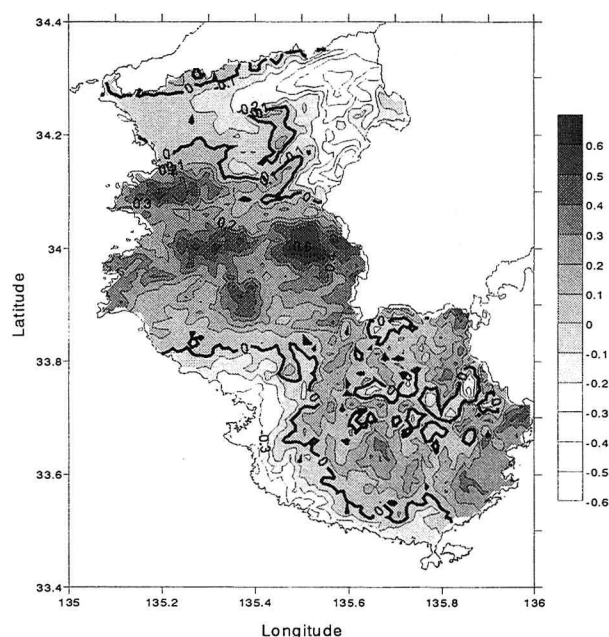


図-9 重回帰モデルによる酸素同位体比の予測精度 Δ_E
(実測値－予測値)

した。実測値との誤差がみられた地域については、地形効果以外の他の要因を考慮する必要がある、降水過程および雨水の同位体比の変動特性など、より詳細な解析を行う必要があると考えられる。

また、本研究では、調査範囲を和歌山県に限って解析を実施したが、和歌山県内で最も重い水は三重県との県境の新宮で観測され、また、最も軽い水は奈良県との県境付近の高野山において観測された。したがって、調査対象域のゾーニングの影響もあることから、広域の水循環を考えるためには、調査範囲を拡大する必要があるといえる。

参考文献

- 1) 海老瀬潜一, 村岡浩爾, 佐藤達也: 降雨流出解析における水質水文学的アプローチ, 水理講演会論文集, 28, pp.547-552, 1984.
- 2) 竹内邦良, 坂本康, 本郷喜彦: NO_3^- を用いた流出成分分離と他の方法による分離結果の比較, 水理講演会論文集, 28, pp.557-565, 1984.
- 3) Takahashi, T., M. Nishida, S. Ohno, and T. Hamada: Tritium concentration in wine, rain and ground-water, Radioisotopes, 18, pp.560-563, 1969.
- 4) Dansgaard, W.: Stable isotopes in precipitation, Tellus, Vol.16, pp.436-468, 1964.
- 5) 早稲田周, 中井信之: 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成, 地球化学, vol.17, pp.83-91, 1983.
- 6) 和歌山県企画部統計課: 和歌山県のすがた(平成13年版), 48p.
- 7) Craig, H.: Isotopic Variation in Meteoric Waters, Science, Vol.133, pp.1702-1703, 1961.

(2002. 9. 30受付)