

紀伊半島における地表水の安定同位体比の空間分布と 降雨-地形特性との関係

RAINFALL-TOPOGRAPHY EFFECT ON SPATIAL DISTRIBUTION OF STABLE ISOTOPE RATIOS OF SURFACE WATER IN KII PENINSULA

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 和歌山市栄谷930)

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

We measured oxygen stable isotope ratios ($\delta^{18}\text{O}$) of surface water in Kii Peninsula, and showed their spatial distribution. As a result, the enriched $\delta^{18}\text{O}$ composition of surface waters were distributed in the southeast area and the depleted $\delta^{18}\text{O}$ composition of surface waters were distributed in the inland area where the altitude was high (>1000 m). In order to understand the spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ composition of surface water, rainfall characteristics were considered as well as topographic effect. We classified the rainfall characteristics with three zones using a ratio of the total number that means how many times precipitation was simultaneously observed between AMeDAS observation stations: 1) the east and southeast area (zone A), 2) the southwest area (zone B), 3) the northwest area (zone C). From the correlation analysis between $\delta^{18}\text{O}$ and topographic data, we can find that the zoning effects on the topographic effect, especially in a meso-scale area. Our observation result shows that the $\delta^{18}\text{O}$ composition of surface water was enriched in high precipitation area. This result does not correspond to the isotopic amount effect. We think this reasons that continuous vapor supply from the sea keeps $\delta^{18}\text{O}$ composition of rain clouds enriched.

Key Words : Oxygen stable isotope ratio ($\delta^{18}\text{O}$), Surface water, Spatial distribution, Kii Peninsula

1. 序論

水の安定同位体比は蒸発・凝縮する際に、レイリー過程にともない同位体組成が変化することから、地理的条件や降雨特性によって時間変化および空間分布特性が決定される。また、安定同位体は化学成分のように周辺物質との化学反応を起こさないことから、水循環のトレーサとして利用されている¹⁾。例えば、雨水の安定同位体比は水蒸気の起源や雨雲の移動に関する研究に利用されており、近年では大気循環モデル²⁾やボックスモデル³⁾を利用した全球スケールでの雨水の安定同位体比の予測が行われている。また、雨水や融雪水、地下水、土壌水などあらゆる水の安定同位体比は、起源の異なる水の混合の解析や滞留などの水文循環における水の動きの把握に広く利用されている⁴⁾。

一方、石塚ら(2003)⁵⁾は和歌山県全域を対象として地表水の安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$, δD)を分析し、メソスケール領域における緯度・標高・海岸からの距離と安定同位体比の空間分布特性との関係を重回帰分析により定量的に評価した。その結果、緯度の変化により安定同位体比が空間的に最も大きく変化する結果を得た。しかし、重回帰式より求めた予測分布と現地観測データが一致しない結果も得られた。その原因として、①重回帰分析に降雨特性を考慮していない点、②観測領域が和歌山県に限定されている点、が考えられた。

そこで、本研究では、観測領域を紀伊半島全域に拡大し、地表水の酸素安定同位体比の空間分布を調査した。また、降水同時発生率を用いて紀伊半島における降雨特性とその影響範囲を分類し、地表水の安定同位体比の空間分布との関係を調べ、降雨-地形特性が安定同位体比の空間分布特性に与える影響について考察を行う。

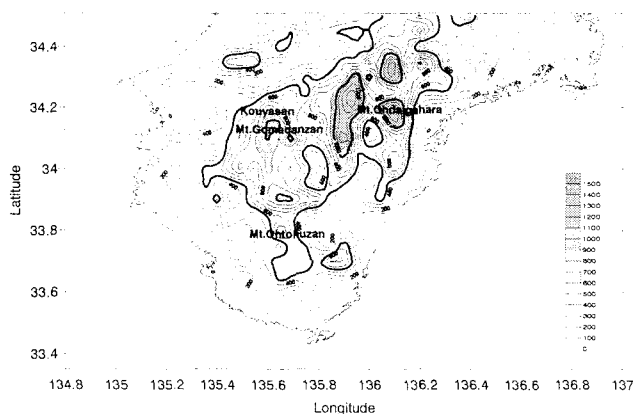


図-1 紀伊半島における標高分布
(国土地理院の数値地図50mメッシュ(標高)より)

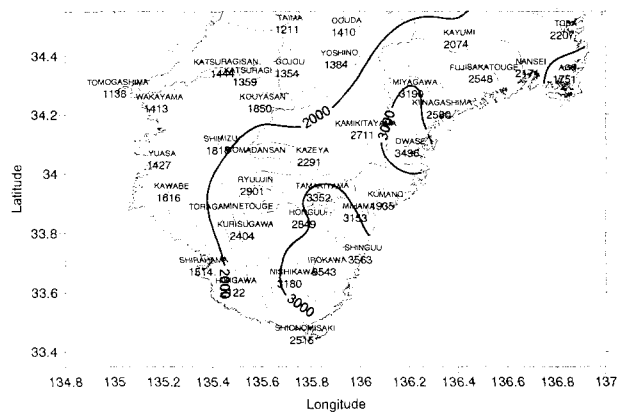


図-2 紀伊半島における年総降水量分布
(2000年AMeDAS観測データ, mm/yr)

2. 調査概要

現地調査は、2001年4～7月の期間に和歌山県76地点⁵⁾、2002年6～7月に奈良県南部・三重県南部87地点、計163地点において実施した。渓流水・地下湧水の採水は、可能な限り山地上流において実施した。この理由は、上流において採水することで、安定同位体比と地形特性との関係を正確に把握することができ、同時に生活排水の混入などの人為的影響を排除することができるため、地表水の結果を用いて雨水の局域的な特性を考察できると考えたからである。なお、降雨直後の渓流水は雨水の影響を受けるため、調査日前の数日間に雨が降っていない日に採水を行った。また、長期的にみると、渓流水の水素・酸素安定同位体比は雨水の同位体比と比較して年間を通じて変動が小さいことより（未発表データ）、空間変化に対して時間変動幅は小さいと考えた。したがって、本研究で示す地表水の安定同位体比は、採水地点周辺における雨水の平均的な同位体比の特性を示すと考えられる。つまり、地表水の安定同位体比を調べることで、雨水の同位体比の特性を知ることができる。

山地上流で採水された地表水は基本的に雨水起源であると考えられるが、採水した水が内陸からの水であるかどうかの判断は難しい。また、流れてくる間の蒸発による同位体比の変化についても、全くその影響を受けないとはいえない。しかし、和歌山市において別途実施している池水の同位体比の長期観測データ（未発表データ）をみると、蒸発の影響を受けやすい池水であっても蒸発の影響は、夏季（7月後半から8月）にかけて、かつ、降雨の少ない場合以外はみられないことから、ここでは蒸発による影響は無視できると考えた。

採水したサンプルは後日、安定同位体比測定用質量分析装置（Thermo Finnigan社製、サーモクエストDELTA PLUS）を用いて、水素・酸素安定同位体比の測定を行った。

3. 紀伊半島の地形・降水量・降雨特性

(1) 地形特性

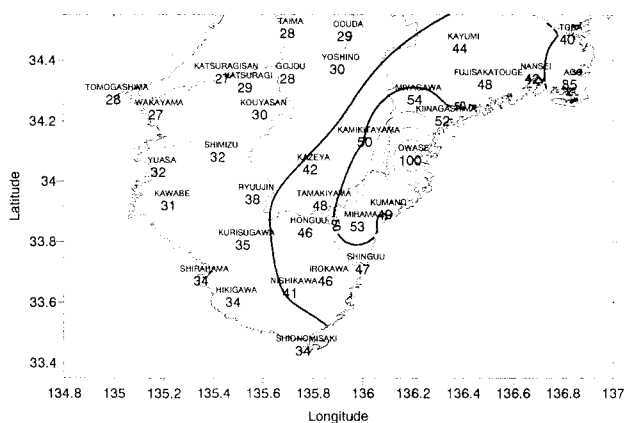
図-1 は紀伊半島の標高分布を示す。紀伊半島は和歌山県と大阪府の県境の和泉山脈および三重県中部の高見山地の南側に位置する。紀伊半島は地質年代の第四紀からの急速な隆起により急峻な地形が形成された。中央部には紀伊山脈が存在し、高野山(900 m)、護摩壇山(1372 m)、大塔山(1122 m)、大台ヶ原(1695 m)、仏生ヶ岳(1805 m)、国見山(1418.7 m)、高峰山(1044.8 m)などがある。また、紀伊半島東部の尾鷲や南東部の新宮、中央部の大台ヶ原では年総降水量が多く、紀ノ川（吉野川）、有田川、熊野川（十津川）、宮川などをはじめとして大小多数の河川が存在する⁶⁾。

(2) 降水量特性

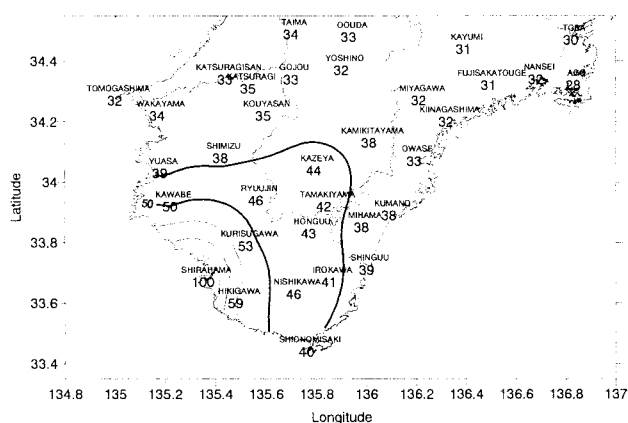
図-2 は2000年における紀伊半島の降水量分布を示す。年間を通じて観測が行われている34地点のAMeDAS観測所の降雨データを用いた。紀伊半島の南東に位置する三重県の尾鷲、宮川、和歌山県の新宮、色川などでは3000 mm/yrを超え、全国平均値（1714 mm/yr）と比較すると非常に多い。とくに、尾鷲の日最大降水量806 mm(1968年9月26日)は日本で最大の記録である⁶⁾。同様に、四国および九州の南東地域においても降水量が多い特徴がみられるが、これは太平洋側の低気圧や台風による南一南東からの湿った空気が陸地の南東側斜面を上昇し、発生した対流性雨雲の影響により、局所的な降雨がもたらされるためである⁷⁾。一方、紀伊半島の西側の和歌山市では1413 mm/yr、奈良県当麻では1211 mm/yrである。また、年間を通じた降水量変化をみると、冬季（12～3月）に少なく、6・7月は梅雨前線による降雨、8・9月は台風による降雨という特徴を示す。

(3) 降雨特性

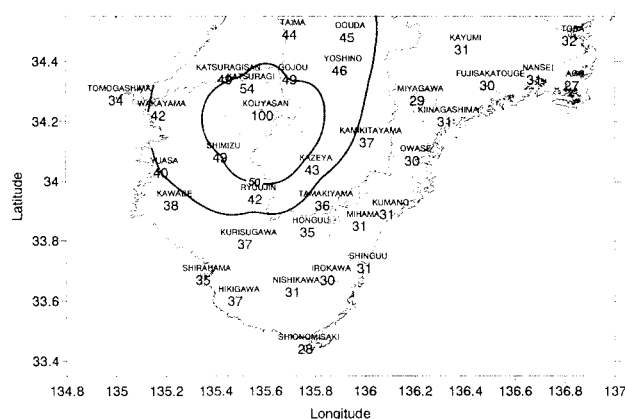
前節で述べたように、紀伊半島東部・南東部では降水量が多く、半島西部や中央部とは降雨特性が異なると考



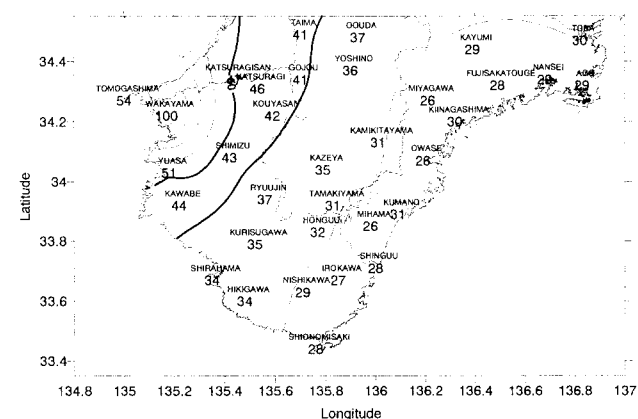
(a) 尾鷲を核地点とした場合



(b) 白浜を核地点とした場合



(c) 高野山を核地点とした場合



(d) 和歌山市を核地点とした場合

図-3 1 mm/h 以上の降水同時発生率（太い等値線はそれぞれ50％と40％を表す。2000年AMeDAS観測データ，単位％）

えられる。本研究では、降雨特性と同位体比の空間分布との関係をみるために、降水同時発生率を用いて紀伊半島における降雨特性の分類を行う。

降水同時発生率とは、特定の地点（核地点）と任意の地点において降雨が同時に発生する統計的確率を表し、地形に特有な雨雲の形成や出現範囲、移動経路を知ることにより利用できる⁸⁾。降水同時発生率は、次式のように定義される。

$$\text{降水同時発生率} = \frac{\text{任意地点と核地点で同時に } X \text{ mm/h 以上の降水のあった回数}}{\text{任意地点または核地点で } X \text{ mm/h 以上の降水のあった回数}} \times 100 \quad (1)$$

降水同時発生率は以下に示す特徴がある。①降雨特性が空間的に均一な場合、核地点を中心とした同心円状の分布となる。②等値線が歪む場合には、雨雲は地形の影響を受けて移動が遮られていると考えられる（山地では変化が大きく、平地では変化が小さくなる。）。③降水同時発生率の分布は、出現頻度の高い雨雲分布パターンを反映している。④核地点では100%の値となる。

AMeDAS観測所全34地点について降水同時発生率の空間分布図を作成したが、ここでは特徴的な結果が得られた尾鷲、白浜、高野山、和歌山市の結果を図-3に示す。

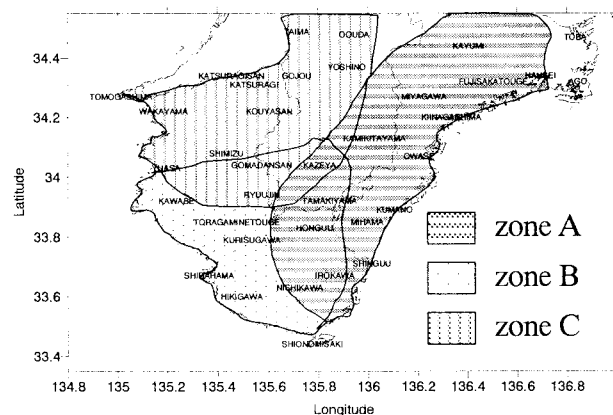


図-4 紀伊半島における降雨特性の分類

本研究では、降水同時発生率40%の等値線までを降雨の影響範囲とした。尾鷲を核地点とした場合（図-3(a)）、尾鷲から最も近い観測地点である西側の北上山に向かう等値線の間隔が狭く、等値線は南西－北東方向へ広がっている。このことから、降水同時発生域は標高差の大きい尾鷲の西側には広がらずに、南勢から西川までの海岸線に沿って分布することが分かる。また、白浜を核地点とした場合（図-3(b)）、奈良県の風屋方向に等値線が広がっており、白浜に到達した雨雲は北東方向に移動する特性を有することが分かる。また、高野山、和歌山市を核地点とした場合（図-3(c), (d)）、核地点を中心に

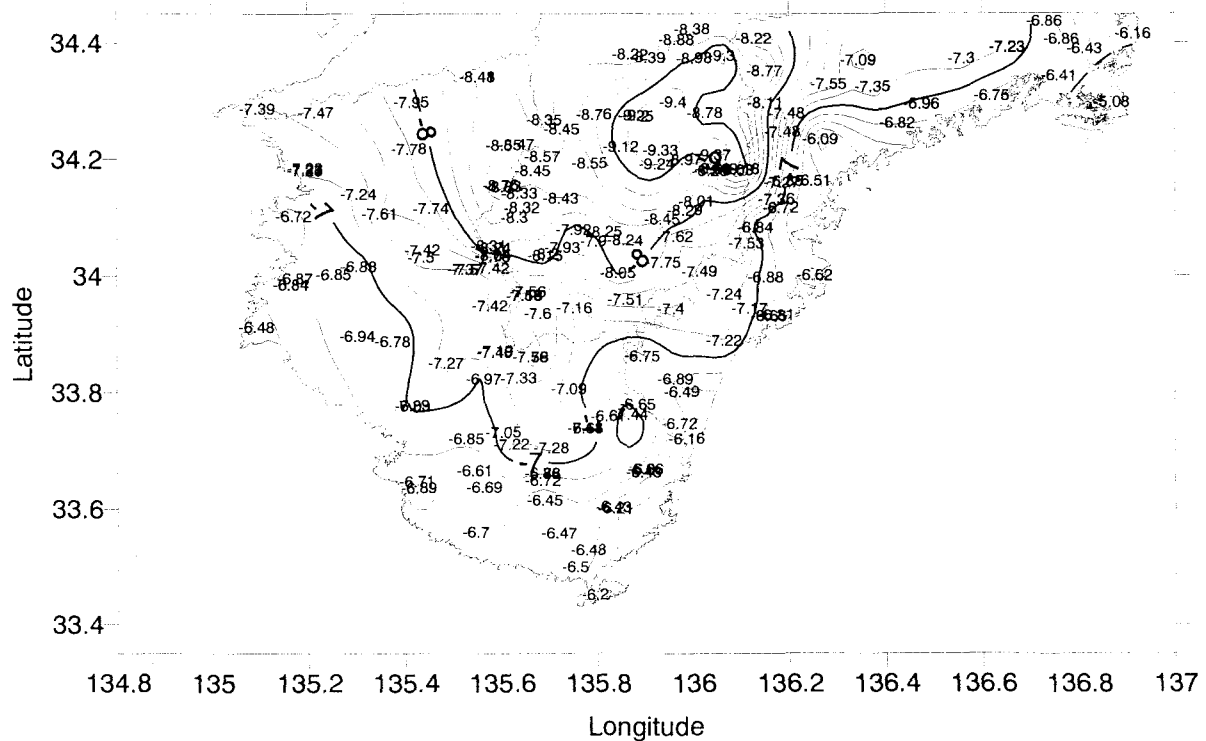


図-5 地表水の酸素安定同位体比の空間分布

等値線がほぼ同心円状に分布していることより、空間的にはほぼ均一に降雨が発生する地域であることがわかる。なお、高野山と和歌山市は相互に影響範囲に含まれており、降雨特性が同じ地域であると考えられる。

以上より、紀伊半島における降雨の影響範囲について分類した結果を図-4に示す。降水同時発生率40%の分布から、尾鷲を中心とした紀伊半島東部・南東部地域をzone Aとする。また、降水同時発生率40%の等値線は、降水量2200 mm/yrの等雨量線にほぼ等しく(図-2参照)、多雨地域と一致する。この地域は、海岸近くに標高の高い山々が分布しており、半島の南東斜面に到達した雨雲により多量の雨が降る地域である。その影響範囲は、北は南勢・粥見、南は西川、内陸方向には大台ヶ原や十津川(風屋付近)を含む。一方、白浜を核地点とした降水同時発生率40%をzone Bとする。また、高野山と和歌山市は互いに影響範囲に含まれることから、ほぼ同じ降雨特性であると考えられ、これらの地域の降水同時発生率40%分布をzone Cとする。日本は、頻繁に温帯低気圧や台風が通過する地域であり、その移動経路の多くは西から東もしくは南から北となる。したがって、zone B、Cでは、西から東もしくは南から北に移動する(一般的な)雨雲の影響を受ける地域であると考えられる。ここで、zone Bとzone Cの違いについて、zone Bは太平洋側に張り出した半島南西部に位置しており、移動する雨雲が先に陸地に接する地域である。一方、zone Cは半島北西部に位置するため、南から北への雨雲の移動についてはzone Bを通過した後の影響を受ける。

表-1 ゾーン毎の酸素安定同位体比と地形特性との相関係数

$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	緯度(°)	海岸からの	
		標高(m)	距離(km)
ZONE A	-0.52	-0.88	-0.62
ZONE B	-0.79	-0.83	-0.83
ZONE C	-0.56	-0.66	-0.55

4. 調査結果

(1) 酸素安定同位体比の空間分布特性

図-5は、紀伊半島における地表水の酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の空間分布を示す。重い同位体組成(-6.09‰, -6.16‰)は尾鷲や新宮などの紀伊半島南東部付近に分布し、軽い同位体組成(-9.40‰)は奈良県中央部の川上村で観測された。全体的な特徴として、同位体組成は海岸に近いほど重く、内陸に向かうにつれて軽くなる。紀伊半島における南北方向の変化をみると、南側では重く、北側では軽くなる傾向がみられる。ただし、三重県鳥羽付近は調査領域の北側に位置しているが、同位体組成は重く、必ずしも緯度による明瞭な変化がみられる結果は得られなかった。また、降水量分布と比較すると(図-2参照)、降水量が多い紀伊半島東部および南東部において同位体組成が重くなり、雨量効果(降水量の多い地域における雨水の同位体組成は軽くなる特徴)

と逆の結果を示した。言い換えると、半島東部と西部とでは同位体比の分布の特徴が異なる結果が得られた。

(2) 地形効果と領域依存性（ゾーニング）との関係

本節では、図-4 で分類した3つのzoneにおける地形（緯度、標高、海岸からの距離）と同位体比との関係を見る（表-1 参照）。ここで、海岸からの距離の定義および降水量データの取り扱い（石塚ら（2003）⁵⁾）と同様である。なお、99%の信頼区間において無相関検定を行った結果、降水量と同位体比との関係は有意性がみられなかったため、解析から除外した。解析に用いたデータ数はzone Aでは81個、zone Bでは70個、zone Cでは65個であり、各zoneが重なる地域においてはデータを重複させた。その結果、zone Aでは標高との相関が高く、海岸からの距離や緯度との関係はみられなかった。また、zone Bでは3つの地形効果と相関が高く、逆にzone Cでは各地形効果との相関が低くなった。zone Bにおいて同位体比と緯度との関係がみられた理由として、①降水同時発生率の空間分布からわかるように海上から陸地に上陸した雨雲が内陸部へ北東方向もしくは北向きに移動するため、②雨雲の移動方向と標高増加および海岸からの距離の増加が一致する地形形状を呈しているため、と考えられる。また、zone Cにおいて緯度との関係がみられなかった理由として、zone Cではzone Bから北上する雨雲の影響を受けるだけでなく、西から東に移動する雨雲の影響を受けているため、両者の混在した影響が表れていると考えられる。以上の結果より、同位体比との関係がみられる地形効果が各zone毎に異なることから、メソスケール領域についてはゾーニングの影響が大きく表れることが明らかとなった。

試行的に、石塚ら（2003）⁵⁾ が実施した和歌山県における調査結果の領域依存性を調べるため、領域を県別に分類して相関係数を算出した結果、緯度・標高・海岸からの距離との関係がみられた和歌山県の結果とは異なり、奈良県南部では海岸からの距離との関係がみられず、また、三重県南部では緯度との関係がみられなかった。したがって、上記の結果と同様に、領域の設定（県別）により各地形効果の影響が異なる結果が得られた。

5. 考察

(1) 凝縮過程における気相・液相の同位体分別

同位体分別を伴う物質の凝縮、蒸発はレイリー過程にしたがう。レイリー過程とは、ある同位体組成を有する水が、同位体組成の変化をとめないながら異なる相へ連続的に分離していく過程を表す。気相から液相へ変化する際に用いられるレイリー式を以下に示す。

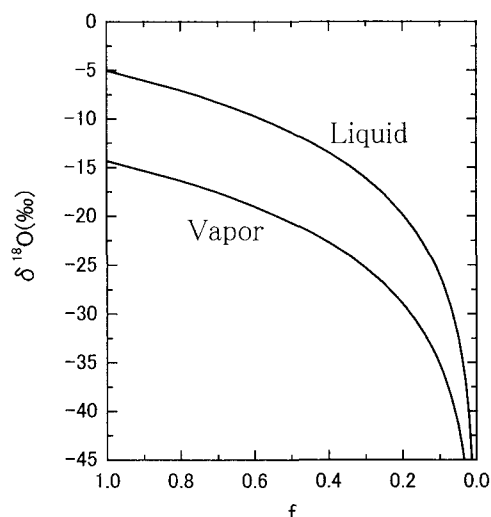


図-6 レイリーの凝縮過程

気相のレイリー式：

$$\delta^{18}O_v = 10^3 (f^{\alpha_{l-v}-1} (1 + 10^{-3} \delta^{18}O_{v,0}) - 1)$$

液相のレイリー式：

$$\delta^{18}O_l = 10^3 (f^{\alpha_{l-v}-1} (1 + 10^{-3} \delta^{18}O_{l,0}) - 1)$$

ここで、 $\delta^{18}O$ は酸素同位体比、 f は気相の残留率、 α_{l-v} は水-水蒸気間の同位体分別係数、 $\delta^{18}O_{v,0}$ は初期状態での水蒸気の同位体比である。また、添字 v は水蒸気、 l は水（液体）を表す。図-6 は、気温 $T=25^\circ\text{C}$ として、液相の同位体比の初期値を紀伊半島における観測結果から、 $\delta^{18}O_{l,0}=-5.0$ とした場合の凝縮過程における同位体比の変化を示す。なお、 25°C の場合、 $\alpha_{l-v}=1.009$ である⁹⁾。

レイリー過程にしたがって雨雲内の水蒸気が雨滴に相変化する際の同位体分別を考えると、図-6 より、同一群の雨雲による連続的な降雨の場合、雨滴内の同位体組成は徐々に軽くなり、その結果、降水量が多い場合に雨水の同位体組成は軽くなることがわかる。つまり、同一群の雨雲が停滞している場合や、雨雲の移動過程においてそれまでに重い同位体がすでに分別した後の雨雲がもたらす降雨の同位体組成は軽くなる。ここで、雨雲が上陸する場合には、内陸効果や高度効果が生じ、雨雲が南から北に移動する場合には緯度効果が生じる。

(2) 酸素安定同位体比と降雨特性

北半球において、一般的に低気圧は西から東もしくは南から北に移動する。このとき、雨雲中の水蒸気がレイリー過程にしたがって分別すると考えると、雨雲は西から東もしくは南から北に移動するにつれてより軽い組成の雨水をもたらすため、紀伊半島では、南西部もしくは西部から内陸方向に同位体組成が軽くなると考えられる。紀伊半島の同位体比分布をみると、zone B、zone Cでは南西から北東に向かって同位体組成が軽くなる傾向がみられ、この分布は、雨雲の移動方向と関係があると考え

