

公表用論文要約

大谷 侑也

論文題目

アフリカ熱帯高山の氷河縮小が周辺水環境に与える影響の解明
—水の安定同位体を利用して—

第 I 章では本論文の背景、目的、分析手法について説明した。東アフリカ中央部の赤道直下に位置するケニア山 (5,199 m) とキリマンジャロ (5,895m) は、山頂部分に氷河を有する。しかし、近年の気候変動によりその氷河は急速に縮小しており、2020~2030 年代には完全に消滅することが予測されている。近年、山麓に流れる河川水や湧水が減少しており、その原因は氷河縮小によるものであると指摘されているが、それに対する定量的な調査は未だ行われていない。こうした中で、将来的な地域の水資源管理のためにも、氷河と山麓水資源の関係性を把握する意義があることを主張した。そこで、本論文では実地調査や水の分析から、氷河の縮小が周辺域の河川水・湧水に与えるインパクトを詳細に検討することを目的とした。

次に、ケニア山と、キリマンジャロで行われた過去の研究例をレビューした。その結果、両地域では地形、気候、動植物に関する既往研究の蓄積は大きいですが、氷河縮小が周辺の水環境に与える影響を検討した研究がほとんどみられない点を指摘した。そこで、物質循環の研究に多く用いられてきた「安定同位体」に着目した。そして既往研究を概説するなかで、氷河と水資源の関係性の解明には、水に含まれる酸素・水素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ ・ δD) を利用した分析手法が有用であることを説明し、それらデータの解釈の方法やサンプリング方法を検討した。

第 II 章では、本論文で重要となる環境同位体を用いた手法の有効性を立証するために、鹿児島県与論島において安定同位体の物質動態について検証した。研究対象地域である与論島は「東洋の海に浮かび輝く一個の真珠」と称され、また 1970 年代には礁池内に数多くの枝サンゴが群生していた。しかしながら、2005、2006 年の礁池内サンゴ被度調査によると、いずれの地点も非常に低い被度であった。与論島ではサトウキビ栽培が盛んであり、多くの硫安性化学肥料（以下、硫安）が施肥されている。また与論島の地質構造は隆起サンゴ礁からなる石灰岩地形であり、降水が地中を通して海域へ流出しやすい。その過程で硫安が海域に流出し、サンゴ礁生態系に影響を与えている可能性が考えられた。そこで、硫安によるサンゴ礁への影響を窒素安定同位体 ($\delta^{15}\text{N}$)、硫黄安定同位体 ($\delta^{34}\text{S}$) 分析を用いて検証した。硫安中の $\delta^{34}\text{S}$ は 0‰程度であるので、もしその流出が起きているのであればサンゴ骨格中 $\delta^{34}\text{S}$ にその値が反映されるはずである。本調査は与論島沿岸で行い、採取された礁池内

外のハマサンゴ年輪（1979～2013年）の $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 分析を行った。その結果、サンゴ骨格中 $\delta^{15}\text{N}$ は化学肥料の値と近似した結果が得られた。一方で $\delta^{34}\text{S}$ は硫安の値を直接反映しなかった。しかし、年輪解析の結果、サンゴ骨格中の $\delta^{34}\text{S}$ の1979～2013年、1990～2013年にかけて2～5%程度の減少傾向を示した。以上の結果から、ハマサンゴ骨格中の $\delta^{34}\text{S}$ に対して硫安由来の $\delta^{34}\text{S}$ の値（0%程度）は強く反映されていないことが確認されたが、その値は1979～2013年にかけて一貫した減少傾向を示しているため、 $\delta^{34}\text{S}$ の低い陸域物質の海域流入量がゆるやかに増加している可能性が示唆された。

以上第II章で実施したサンゴ骨格を用いた物質循環に関する研究は、化学肥料物質が陸に浸透し、地下水を「運び屋」とし周辺浅海域に流出し、それがサンゴにどの程度影響を与えているのかを安定同位体を用いて分析したものである。ここで得られた結果を、氷河と水環境の研究に応用する際、重要となる知見は、化学肥料、地下水、海水、サンゴ礁骨格のいずれにも同位体比保存性が確認されたことである。同位体分別を引き起こす濃縮、蒸発散等の特別な現象が起きなければ、異なる物質間同士の元素の同位体は変化しないことを同位体比保存性という。第II章の研究により、与論島では、島内に施肥された化学肥料物質の同位体比は、地下水を経由しても変化することなく浅海域に流出し、その値がサンゴ骨格に記録されていることが判明した。この知見により、氷河縮小と水環境の変化を調べられる可能性を指摘した。

第三章の実証研究では、第II章で提示した同位体環境学的研究手法をふまえ、東アフリカ中央部に位置するケニア山(5,199 m)の氷河の減少が周辺域の水環境・水資源にどのような影響を与えているのかを、実地観測、同位体比分析、年代測定、聞き取り調査等から明らかにした。研究対象地域山麓部(約 2,000 m)は、降水量が少なく、生活用水をケニア山由来の河川水、湧水に依存している現状がある。しかし、それら水資源と減りゆく氷河の関係性は明らかにされてこなかった。実地調査から、ケニア山の降水に含まれる $\delta^{18}\text{O}$ の同位体高度効果を観測することができた。そこから計算された同位体高度効果直線を用いて、山麓住民が利用する河川水と湧水の涵養標高の推定を試みた。その結果、山麓河川水の涵養標高は約 4,650m、湧水は約 4,700m となり、氷河地帯の融解水が麓の水資源に多く寄与していることが明らかになった。

またケニア山西麓のナロモル川の河川水位と地域の降水量のデータに対し、時系列データを扱うことの出来る統計的手法である状態空間モデルを用いて統計解析を行った。その結果、河川水量は、1985年～2015年に至るまで、減少傾向にあることがわかった。また、その減少により、栽培できる作物種は乾燥に強いもの（ジャガイモ、小麦、トウモロコシ等）に限られている地域の現状を指摘している。また、ケニア山山麓湧水に対して、トリチウムとCFCsの測定を行なった結果、山体での涵養時から40～60年かけて山麓に湧出していることが明らかになった。40～60年前の当

時、ケニア山の 5,000m 付近には広大な氷河が存在していた。一方で、今回年代測定を行なった山麓湧水は氷河地帯から流れてきていることがわかっている。それらの結果から、過去の高標高帯の融雪水、氷河融解水が地下に浸透し、40~60 年の時間をかけて流れ下り、現在の山麓に湧出している可能性が高い点を指摘した。また、ケニア山の季節的降雪・積雪量は非常に少ないので、氷河融解水の山麓湧水への影響が大きいことが推測された。ケニア山の氷河は 2020~2030 年代には消滅することが予想されており、今回の結果から将来的な氷河の消滅は山麓の水資源に少なからず影響を与える可能性が示唆された。

第IV章では、地域の生活用水の集水域として重要な役割を果たしているキリマンジャロを対象に、氷河面積の推移と、その縮小が山体の水資源にどの程度影響しているのかを衛星画像分析、同位体比分析から考察した。その結果、キリマンジャロの氷河は 1912 年~2019 年の間、早いスピード ($0.11\text{km}^2/\text{y}$) で減少していることがわかった。また、2010 年~2019 年の年間減少量は従来のスピードよりも早く ($0.15\text{km}^2/\text{y}$)、そのペースが続けば 2024 年~2026 年にはキリマンジャロから氷河は消滅することが予測された。一方で今回、河川水と氷河融解水に対し酸素・水素同位体比分析を行った結果、乾季における標高 3,939m~4,579m の 5 ヶ所のキャンプサイトの河川水 ($\delta^{18}\text{O} = -6.48\text{‰} \sim -5.87\text{‰}$ 、 $\delta\text{D} = -42.44\text{‰} \sim -37.36\text{‰}$) には、山頂付近の氷河融解水 ($\delta^{18}\text{O} = -6.03\text{‰} \sim -5.14\text{‰}$ 、 $\delta\text{D} = -48.19\text{‰} \sim -39.02\text{‰}$) が寄与していることが判明した。

第V章では、ケニア山、キリマンジャロの水サンプルの酸素・水素同位体比の値の違いに注目し、同じ東アフリカ大地溝帯に属するにも関わらず、なぜ 2 つの山の同位体比に相違が生まれるのか、その要因について考察を行った。その結果、ケニア山とキリマンジャロの気候環境の違いと、氷河の分布高度の差が影響していることが推測された。

次に、アフリカ熱帯高山域における古環境復元について、調査を行った。アフリカの氷河が将来的に消滅することで、周辺環境にどのような影響が及ぼされるのかを理解するためには、過去から現在までのアフリカの氷河とその周辺環境の変遷を知る必要がある。通常、古環境復元を実施する際、用いられる試料は樹木年輪である。しかしケニア山、キリマンジャロの高山帯には年輪をもつ樹木が存在しないため、その研究の実施は難しいとされてきた。こうした中で、本論文においてケニア山の研究・調査を進める中で、半木本類のジャイアント・セネシオ (*Senecio keniodendron*) が高山帯に多く分布していることがわかった。ジャイアント・セネシオは、通常の落葉樹とは異なり、古くなった葉を保温のために幹の外周に保存する。つまり、萌芽から現在にいたるまでの葉がすべて保存されているということである。このジャイアント・セネシオの古い葉を、通常、古環境復元に利用される樹木年輪の代替試料として利用できると考え、ケニア山の 4,500m 付近で調査を実施した。調査と炭素年代測定

の結果、樹高約 2m の個体の最も古い部分にあたる葉は 1958～1960 年に形成されたことがわかった。つまり、ジャイアント・セネシオの幹に整列した葉は年代を記録しており、樹木年輪の代わりとして古環境復元に利用できる可能性が示されたのである。

また、本論文で得られた知見が先行研究に対して、どのような独自性と意義を持つのか議論した。アフリカ熱帯高山の氷河が急速に縮小している中で、これまでは氷河分布の分析や、周氷河地形の解明が主たる研究の潮流であったのに対して、本研究では、同位体を用いて現地調査・分析を実施し、ケニア山山麓で流れる河川水・湧水とキリマンジャロの山体上部の河川水は氷河地帯から流下していることを明らかにした。ケニア山、キリマンジャロのいずれの山頂氷河も 2020～2030 年代には完全に消滅することが予測されていることから、将来的な氷河の消滅が山麓地域住民の水資源に影響を与えることを解明した点は本論文の最も重要な貢献であるといえる。また、山麓地域では河川水量の減少が叫ばれている中で、その定量的な調査はほとんど行われてこなかった。ケニア山の山麓河川水の流量について 1～2 年という短期的な時間スケールでは増加していることが解明されていたが、今回の研究では河川流量データの統計解析を行うことで、10～15 年という長期的なスケールでは減少していることを明らかにした。また、その河川水量の減少により山麓農業に変化がもたらされている点も氷河縮小による環境変化を捉えるうえで重要な知見となるだろう。

しかしながら、本研究では山麓水資源の涵養標高や、氷河と周辺水環境の関係性については把握することができたが、定量的な調査として、氷河が消滅することによる山麓の河川水・地下水の減少量を把握することはできなかった。今後の課題として、氷河の質量を計算し、また氷河地帯から山麓にいたるまでの河川の流量を細かく測定することで、氷河縮小による水資源の減少量を解明する必要がある点を指摘している。

また、ケニア山、キリマンジャロは「熱帯の氷河」として観光産業上、重要なものであり、現地調査から山体の河川水は登山キャンプの運営上、必要不可欠なものであることがわかった。本研究により、その河川水に氷河融解水が大きく寄与していることが判明した。つまり今後の氷河の消滅は登山キャンプの水資源に影響を与え、それに伴って観光産業にも少なからずインパクトを与えることが予察される点を本論文では指摘した。これまでアフリカの熱帯高山において氷河縮小と観光産業の関係性は把握されてこなかった中で、この指摘は新たな視座を提供するだろう。しかし、本研究で実施したケニア山、キリマンジャロでの山麓地域での参与観察・聞き取り調査も十分であるとは言えない。氷河縮小による影響を総合的に理解するためには、そのような社会学的な調査も今後進めていく必要があるだろう。