

京都大学	博士（文学）	氏名	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—		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>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。</p> <p>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（$\delta^{18}O$・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。</p> <p>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（$\delta^{15}N$）、硫黄安定同位体（$\delta^{34}S$）分析を用いて検証した。硫安中の$\delta^{34}S$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$\delta^{34}S$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$\delta^{15}N$、$\delta^{34}S$分析を行った。その結果、サンゴ骨格中$\delta^{15}N$は化学肥料の値と近似した結果が得られた。一方で$\delta^{34}S$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$\delta^{34}S$の1979～2013年、1990～2013</p>			

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 $\delta^{34}\text{S}$ に対して硫酸由来の $\delta^{34}\text{S}$ 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Ⅲ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 ($\delta 180=-6.48\text{‰}\sim-5.87\text{‰}$ 、 $\delta D=-42.44\text{‰}\sim-37.36\text{‰}$)には、山頂付近の氷河融解水 ($\delta 180=-6.03\text{‰}\sim-5.14\text{‰}$ 、 $\delta D=-48.19\text{‰}\sim-39.02\text{‰}$)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。

(論文審査の結果の要旨)

近年地球温暖化により世界各地の氷河は急速に縮小しており、アフリカに氷河を有する3つの高山のうちの、ケニア山(5,199m)とキリマンジャロ(5,895m)においても、氷河は2020~2030年代には完全に消滅することが予想されている。ケニア山とキリマンジャロの山麓部では降水量が概して少なく、地元住民の飲料水や農業用水、生活用水は山麓の河川水や湧水に依存している。近年、その山麓の河川水や湧水が減少しているが、その原因が氷河の縮小にあると指摘されているものの、両者の関係を定量的に明らかにした研究はこれまでにない。本論文は、ケニア山とキリマンジャロの周辺域において現地調査を実施し、水の同位体分析や年代測定等の手法を使って、氷河縮小が周辺域の水環境・水資源に与える影響の解明に取り組んでいる。

本論文の研究としての意義は以下の四点に要約することができる。

第一の意義は、本論文においてケニア山やキリマンジャロでの水の動態を解析するのに、環境同位体を用いているが、その同位体の物質動態への有効性をサンゴ礁で検証したことである。この有効性についてはすでに様々な研究において実証済みであるが、論者はその有効性の正確性を確認するために、鹿児島県与論島においてサトウキビ栽培で使用される硫酸性化学肥料が降水によって海域へ流出し、サンゴ礁生態系へ及ぼす影響を、窒素同位体と硫黄同位体を用いて検証した。そして、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が保存されるという同位体比保存性をあらためて確認した。この同位体比保存性を利用して、ケニア山やキリマンジャロの水の動態を検討した。

第二の意義は、ケニア山の山麓(標高約2,000m)で地域住民が飲料水や農業用水、生活用水として利用している河川水や湧水などの水資源に、標高4,600~4,800mの氷河帯の融解水が大きく寄与していることを初めて明らかにしたことである。論者は、その解析のためにケニア山の様々な標高の降水や河川水、湖水、湧水を採水し、その酸素・水素同位体比($\delta^{18}\text{O}$ ・ δD)を求め、ケニア山における降水の同位体高度効果直線を導きだし、山麓の湧水や河川水が涵養されている水源の標高を解明したのである。またケニア山西麓のナロモル川の河川水量のデータ解析を行い、氷河縮小による融解水の減少や人口増加による河川水の取水量増加によって、河川水量が1985年から2015年に至るまで減少傾向にあることを明らかにした。そして、近年の栽培作物が乾燥に強いジャガイモ、小麦、トウモロコシ等に限定されていることを示した。

さらに、ケニア山山麓の湧水に対してトリチウムとCFCsの測定を行い、氷河帯の融解水が40~60年かけて地下水として運ばれ、山麓で湧水として湧出していることを解明した。すなわち、現在の山麓住民は約50年前にケニア山山頂付近に広大にあった氷河の融け水を飲用水として飲んでいることになり、近年の氷河の縮小や消滅は将来の地域住民の水資源に大きく影響を及ぼすことを本論文は示唆している。

第三の意義は、キリマンジャロの標高3,900~4,600mに位置する5カ所のキャンプサイトの河川水と山頂付近の氷河融解水に対し、酸素・水素同位体比分析を行い、乾季

の高標高の河川水には、山頂付近の氷河融解水が大きく寄与していることを解明したことである。キリマンジャロでは年々登山客が増加し、そのほとんどは乾季に訪れる。水が不可欠なキャンプサイトは河川の近くに設けられているが、氷河が将来的に消滅すれば、キャンプサイトの運営に不可欠な水が枯渇することが予想され、地域の観光産業に少なからず影響が及ぶことを本論文は示している。

第四の意義は、アフリカの熱帯高山における古環境復元の可能性について検討を行ったことである。ケニア山や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、樹木年輪による古環境復元は不可能である。しかしながら、高山帯にはアフリカの熱帯高山特有の、背丈が数m以上にも成長する草本のジャイアント・セネシオ (*Senecio keniodendron*) が広く分布している。ジャイアント・セネシオは古くなった枯葉を落とさず、保温のために幹の外周に保存している。この古い枯葉が古環境復元に利用される樹木年輪の代替資料として利用できると考え、樹高約2mのジャイアント・セネシオの枯葉に対し放射性炭素年代測定を用い、最も古い部分にあたる枯葉の生育年代が約60年前であることを提示した。この手法によって、ケニア山やキリマンジャロの古環境復元に新たな道を開き、今後の研究成果が期待される。

以上のように本論文は、これまで解明されてこなかった、ケニア山とキリマンジャロにおける水の動態を明らかにした。地域住民が利用している飲料水や農業用水、生活用水やキャンプサイトの河川水が、氷河の融解水に大きく影響を受けていることを解明し、地域の農業や観光業などの産業への影響を検討した。前述したとおりケニア山やキリマンジャロは2020年～2030年代にはすべて氷河が消滅すると推測されている。本論文は、その水資源の動態を明らかにすることにより、氷河の消滅が地域住民の生活や産業に少なからず影響を与えることを提示した。本論文は今後の熱帯の水資源の持続的利用を考える上で重要な研究成果であり、地域社会に大いに貢献するものとして、高く評価できる。標高4,000mを超えると空気が薄く、高山病にも悩まされ、極寒の厳しい条件下でのデータ収集は貴重であり、他に代えがたい研究と言えよう。

このような画期的な意義をもつ研究とはいえ問題がないわけではない。ケニア山のデータに比べ、キリマンジャロのデータがやや不十分で、山麓の河川水や湧水に対する氷河の融解水の影響を明瞭に示すことができなかった。また、雨季のデータが不足しているという問題点もある。しかし、この点については、論者が今後の研究の中で克服しうるものであり、本論文全体の優れた内容を大きく損ねるものではない。

以上、審査したところにより、本論文は博士（文学）の学位論文として価値あるものと認められる。2020年1月30日、調査委員3名が論文内容とそれに関連した事柄について口頭試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当分の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。