

アフリカ熱帯高山の消えゆく氷河

— 氷河と山麓水資源の関係性の解明 —

大 谷 侑 也

（サントリーグローバルイノベーションセンター株式会社 水科学研究所）

1. 消えゆく熱帯の氷河

気候変動は近年の人類が直面している喫緊の問題です。その中でも特に影響が大きいと考えられているのが氷河です。世界各地の山岳氷河は1900年代から急速に縮小していますが、最も顕著なのは熱帯アフリカの高山が有する氷河です。アフリカにはキリマンジャロ山、ケニア山、ルウェンゾリ山の3つの高山があり（図1）、それらの頂上付近には氷河が存在します。しかし、いずれも気候変動の影響により10～20年後には消失するとの予測がなされています。中でも、世界遺産に指定されているケニア山の氷河は年約7～10mの非常に速いスピードで縮小しています（図2）。今すぐ現地に行ってモニタリングを開始しなければ氷河の縮小と周辺の水環境の関係性を記録することができなくなると考えました。

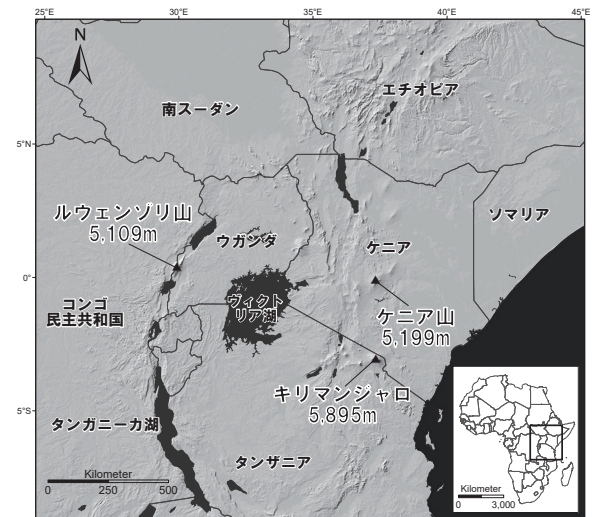


図1. 東アフリカのキリマンジャロ山、ケニア山、ルウェンゾリ山の位置図



(Hastenrath 1976)



図2. ケニア山のティンダル氷河の縮小（左から1992、1997年は水野一晴撮影、2015年、2017年は著者撮影）

そこで、アフリカのケニア共和国（以下、ケニア）へ調査に行くことになりました。私の想像のなかでアフリカは灼熱の大地というイメージがあったのですが、ケニアの首都ナイロビに初めて降り立ったとき感じたのは「涼しい！」でした。これはケニアが「アフリカ大地溝帯」に位置し標高が高いからです。アフリカ大地溝帯は地球の表面を覆うプレート（岩盤）とプレートの境界であり、アフリカ大陸を南北に貫く幅 35 ～ 100 km、総延長が 7,000 km にもおよぶ世界でも有数の地溝帯です。プレートの境界はマグマがでやすく、地下深くで、ある一定以上の量が溜まると地上に噴出（噴火）します。そのためアフリカ大地溝帯には多くの火山が形成されています。

今回、調査対象としたケニア山 (5,199 m) をはじめ、アフリカ大地溝帯が擁する高山は上昇気流を発生させ、多くの雨をもたらします。そのためこれらの山は概して降水量が少ないサバンナにとって貴重な存在であり、地元の人達は山を「Water Tower（給水塔）」と呼んだりします。一方、この給水塔の役割を果たすケニア山は、乾季には雨が少なくなり、山麓地域の水資源は雨季に比べて減少するのですが、現地で観察をすると川の水や湧き水はある一定の量を保ち続けていました。そこで私はこれら 2 つの山が持つ氷河の融け水（氷河融解水）に注目しました。氷河は「天然のダム」とも言われます。これは雨の少ない乾季において氷河の融けた水が、一定量、氷河の下流域に供給され続けるからです。このような氷河と山麓の水資源の研究は、とても大きな氷河が残るヒマラヤやヨーロッパアルプス等では展開されてきましたが、それら地域と比べ雨が少なく、また赤道直下の熱帯高山の氷河に焦点を当てた研究はほとんど見当たりませんでした。

これまでの研究から、マグマが冷えて固まった玄武岩質の火山の上部で取り込まれた水は地下深くまで浸透しやすく、浸透した水は地下水となって山麓で湧き出すことがわかっています。一方、山体の中腹以下の降水は溶岩流のち密な部分に阻

まれて山体の内部に浸透することができず、表流水や浅い地下水となって山麓に流下することも明らかになってきています。このことから、玄武岩でできたケニア山の山麓の湧水は、山体中腹の降水よりむしろ、山体上部の氷河融解水が起源になっている可能性が高いと考えました。

2. 水の「重さ」の違いから麓の水の起源を調べる

氷河と山麓の河川・地下水の水の酸素同位体を分析して、河川水や湧水がどの標高から流れてきているのか（涵養標高）を調べることで、氷河と山麓の水資源の関係性の解明を試みました。ここで少し安定同位体の説明をしておきます。元素には陽子は同じですが中性子の数が異なるため質量数（重さ）の異なる原子が存在し、これを同位体といいます。そのうちの多くは時間の経過とともに崩壊し他の核種に変化する放射性同位体ですが、安定同位体は時間が経過しても不変です。また、安定同位体は自然界の様々な物質の循環過程のなかでその同位体比が変化します。そして質量数の大きい同位元素が多ければ同位体比が高い＝重いと表現され、それと比較して同位体比が低ければ「軽い」と表現されます。これらの同位体比の「重さ」を詳しく分析・比較することにより、自然界の物質の循環内での位置付けや、生成経路を明らかにする研究が多くなされてきました。

降水中の酸素同位体比は、同位体高度効果（標高が高くなるにつれ同位体比が低くなる効果）を示します。これは、水蒸気が雨滴として凝結する際に重い同位体が濃縮するため、残された水蒸気の同位体が軽くなるというメカニズムに基づきます。これを図で示しますと、雲が山麓に流れ込んでくると、標高の低い地域では同位体比の高い（重い）水を含んだ雨が選択的に先に降ります（図 3 の①）。

重い同位体を含む雨が先に降り、水蒸気の同位体比が軽くなることで、高い標高帯で降る降雪や山体上部の氷河ほど水の同位体比は低く（軽く）なっていきます（図 3 の②）。

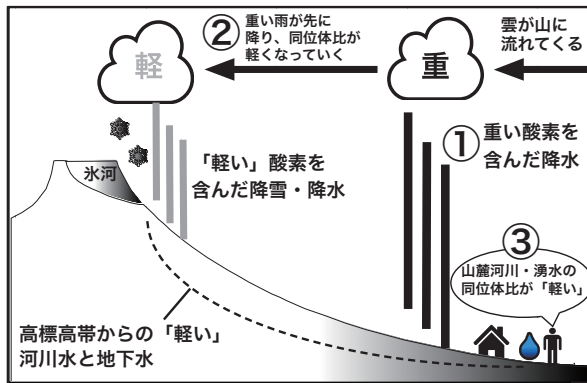


図3. 同位体高度効果と水の起源把握のメカニズム

本研究では、この高度効果による氷河・積雪と、山麓の降水の同位体比の違いを利用して、山麓湧水・河川水の涵養標高の推定を実施しました。もし、ケニア山の山麓の河川水と地下水の同位体比が、山麓の降水と比較して低く（図3の③）、高標高帯の氷河や積雪の値に近ければ、山麓湧水・河川水は氷河地帯から流れてきていることがわかります。

以上のメカニズムを利用し、山麓の湧水・河川水がどの標高帯から流れてきているかを推定し、麓の水資源の起源を明らかにしようと考えました。

3. 山麓の河川水・湧水の涵養標高の推定

実際にケニア山に登り、フィールドワークを行いました。まず驚いたのは標高によって自然環境が目まぐるしく変わることでした。4,000 m 以上の高山帯では岩盤から開放されたばかりの大きな岩や氷河・積雪があり（図4：a）、4,000～3,200 m ではジャイアント・セネシオといった半木本植物が多く見られました（図4：b）。3,200～2,300 m ではジメジメとした湿気の多い森林帯（雲霧帯ともいう）があり（図4：c）、そこを抜けると山麓帯があり、乾いた大地が広がります（図4：d）。

ケニア山の標高ごとに採水した降水サンプルの酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）は、標高が高くなるにつれ低くなる高度効果を示しました。そこから高度効果直線を算出しました（図5）。この直線により山麓の水の涵養標高を推定することができました。山麓の湧水の $\delta^{18}\text{O}$ の平均値（-3.73‰）を高度効果直線に代入すると（図5の①）、涵養標高は4,916 m となり、また山麓の河川水（-3.03‰）の涵養標高は4,650 m と推定されました（図5の②）。

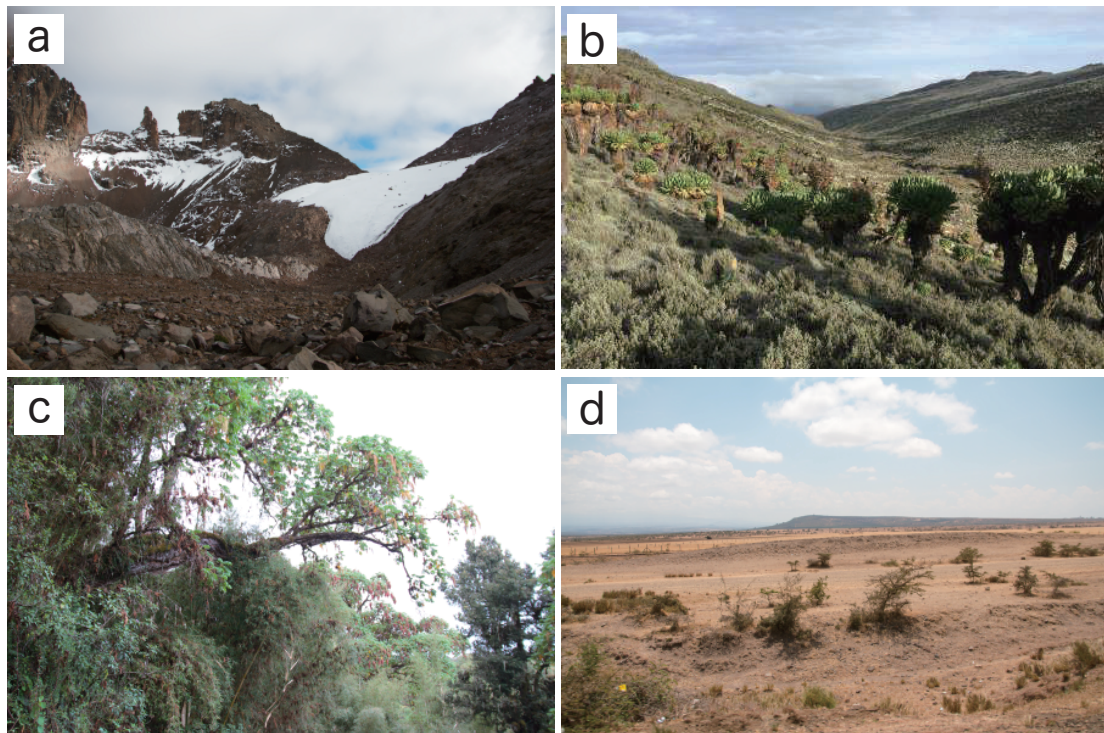


図4. ケニア山の標高ごとの風景。a) 高山帯 (>4,000 m)、b) ヒース・湿地帯 (3,200-4,000 m)、c) 森林帯 (2,300-3,200 m)、d) 山麓帯 (<2,300 m)

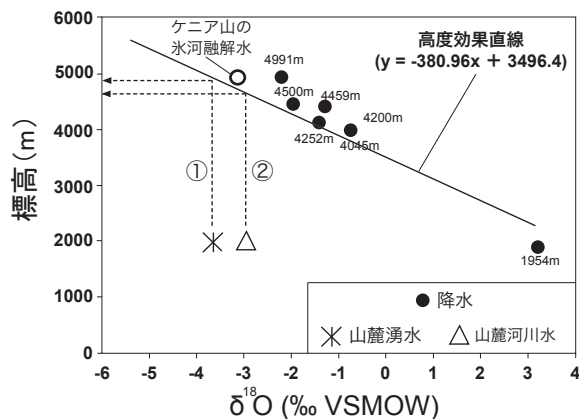


図 5. ケニア山の高度効果と山麓の湧水と河川水の涵養標高の推定

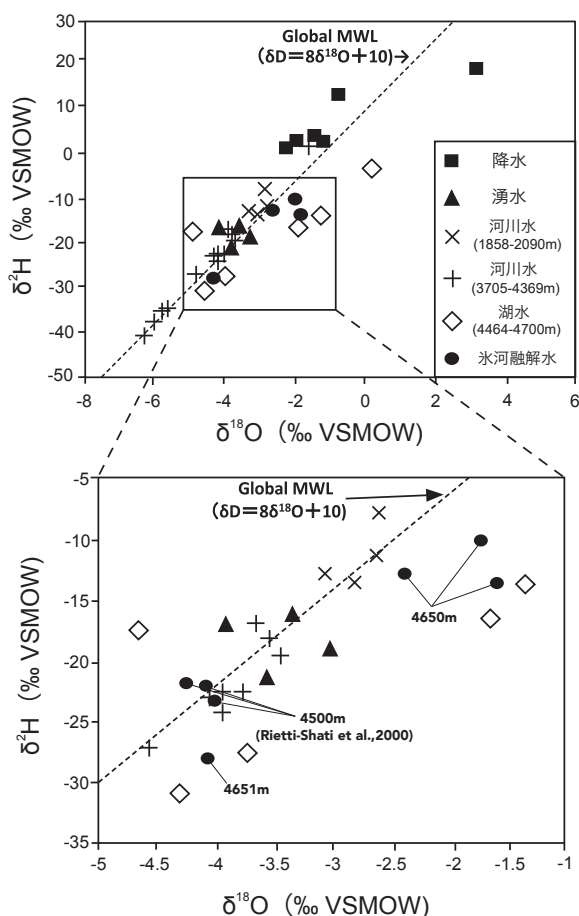


図 6. ケニア山で採水された各種水サンプルの水素 ($\delta^2\text{H}$)・酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$)

また、降水、湧水、山麓の河川水(1,858 m-2,090 m)、高標高の河川水(3,705 m-4,369 m)、湖水(4,464 m-4,700 m)の $\delta^{18}\text{O}$ と水素同位体比 ($\delta^2\text{H}$) をプロットしたものが図 6 です。各サンプルのデータはおおよそ Global MWL (天水線) に沿うことが分かりました。天水線とは世界各地で採水

された降水や河川水、湖水といった循環する水の $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の間の一定の関係を示す直線のことです。プロットされたデータを見てみると、山麓の湧水や山麓の河川水、高標高の河川水は降水よりもむしろ氷河融解水の値に近いことがわかりました。山麓を流れる水が完全に氷河由来である、ということまでは言い切れませんが、これらの結果から、乾季の山麓湧水と山麓河川水は、中腹の降水よりも、氷河地帯の水が涵養源となっている可能性があることがわかりました（大谷，2018）。

4. 山麓湧水の年代測定

4,900 m 以上の高山帯が涵養源とわかった乾季の山麓湧水に対して、トリチウムという放射性同位体とフロン類を用いた年代測定を行いました。その結果、湧水は山体（約 4,900 m 以上）で取り込まれてから山麓で湧き出すまでに約 40 ～ 50 年かかることがわかりました。図 2 からわかるように 40 ～ 50 年前のケニア山の 4,900 m 付近にはまだ広大な氷河が存在していました。したがって現在の山麓湧水には過去のケニア山の氷河融解水が寄与している可能性があります。氷河は 10 年以内に消滅する可能性が高いので、それは山麓湧水の涵養源が大きく失われることを意味します。つまり 50 ～ 60 年後、地域住民にとって重要な山麓湧水に大きな影響が出てくることが予想されます。

今後は同位体を使った調査のみならず、氷河が失われることで山麓の水資源が量的にどの程度減るのかを水循環モデルを用いて解明しようと考えています。

尚、本研究は筆者の大学院在籍時の研究業績であり、現所属先とは一切関係がありません。

文献

- 大谷侑也（2018）：ケニア山における氷河縮小と水環境の変化が地域住民に与える影響．地理学評論，91（3），211-228.
- Hastenrath S (1976): Weitere beobachtungen zu bodenfrosterscheinungen am Mount Kenya.

Zeitschrift für Geomorphologie, 20: 235–239.

Rietti-Shati M, Yam R, Karlen W, Shemesh A
(2000) Stable isotope composition of tropical
high-altitude fresh-waters on Mt. Kenya,
Equatorial East Africa. Chemical Geology
166 (3–4): 341–350.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00233-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00233-8)

著者情報



大谷侑也（サントリーグローバル
イノベーションセンター株式会
社）2020 年京都大学大学院文学
研究科地理学専修修了、博士（文
学）。2020 年より現職。

（2022 年 3 月 31 日掲載）

