

大項目	2	持続可能な社会の実現に向けた地球的課題と国際協力			
中項目	2-2	地球的課題とは何か			
小項目	2-2-1	世界の自然の大局を理解して、地域多様性や地球的課題を考える基礎としての自然地理—世界の自然の見方を学ぶ（スケールや視点を変えると見えてくるものが変わる）			
細項目	2-2-1-7 氷河縮小	氷河縮小が生態系へどのような影響をもたらすか			
作成者名	水野一晴	作成年/修正年	2017/2021/2022/2023/2024年	Ver.	1.4

キーワード 5~10個程度	温暖化、熱帯高山、氷河縮小、植生遷移、生態系
------------------	------------------------

### 発問と答え

#### 1) 熱帯高山における近年の氷河縮小が、温暖化の影響であることを理解する。

ケニア山の氷河はどれも急速に縮小しています。ケニア山第二の氷河のティンダル氷河も、同様に、急速に後退しています（図 1）。その氷河の後退速度は、1958年～1997年では約 3m/年でしたが、1997年～2022年では、約 7m～17m/年と速くなっています。1997年には筆者は氷河の末端からヒョウの遺骸も見つけました（図 2）。そのヒョウの遺骸の年代を、放射性炭素年代測定法によって測定した結果、今から 900年～1000年くらい前のヒョウであることがわかりました。今から 900～1000年前といえば、日本で言えば平安時代の末期にあたります。世界的に平安時代の頃は温かい時代で、その後 19世紀まで寒い時代が続き、20世紀以降温暖化が進んでいます。つまりヒョウの遺骸は、氷河の中で 800年くらい続いた寒い時代の間氷づけになっていて、ここ 100年間くらいの急速な温暖化で氷河が融け、ヒョウの遺骸が出てきたこととなります。ケニア山の西側山麓の Nanyuki 気象ステーション（0.03° N、37.02° E、高度 1,890m 地点）の気温は 1963年から 2010年までの 47年間で 2°C以上上昇しています（図 3）。一方、1956年から 2011年までの同地点での降水量データを見ると顕著な降水量の減少はありません。

高度 1,890m の上記観測地点の気温データと高度 3,678m のケニア山グローバル大気観察(GAW)ステーション(0.06° S、37.30° E)の気温データから、気温の低減率は 0.63°C/100m と求められ、それから氷河末端の高度 4,500m の気温を算出しました。その高度 4,500m の月平均最低気温の変化と氷河の後退過程は統計分析の結果、有意な関係があることが判明しました。このことから、ケニア山の氷河縮小はおもに気温上昇（温暖化）が原因であることが推察されました。

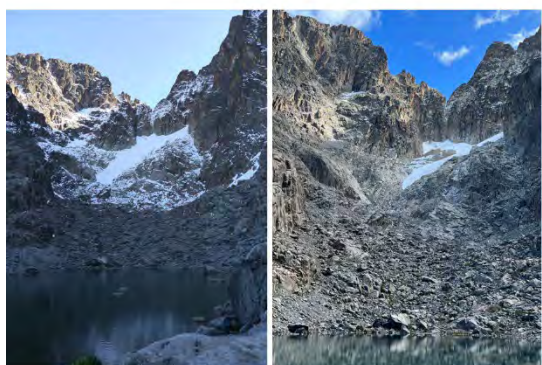
## 図と表のページ



1992年

2002年

図1 1992年から2022年までのケニア山第二の氷河、ティンダル氷河の縮小変化（撮影：水野一晴）。



2011年

2022年

図2 1997年にティンダル氷河の中から発見された900～1000年前のヒョウの遺骸。世界的な気候変動を裏付ける物証となった（撮影：水野一晴）。

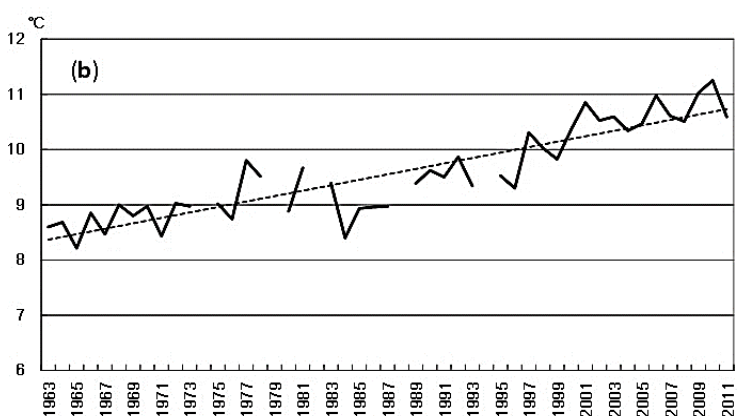
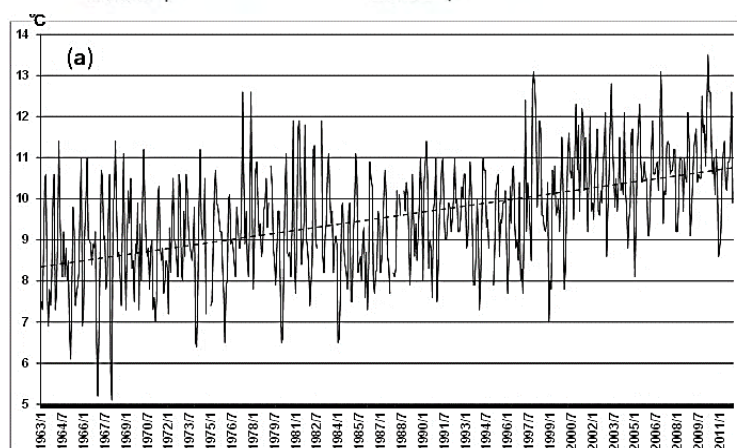


図3 ケニア山山麓1,890m地点での1963年から2011年までの気温変化。(a)日最低気温の月平均値, (b)日最低気温の年平均値(ケニア気象庁のデータより水野作成)。

## (2) 氷河の後退と植生の遷移を理解する。

図 4 は、ティンダル氷河末端と周辺の地形を示しています。氷河が拡大するときは、氷河はブルドーザーのように岩礫や土砂を前に運び、氷河が縮小すると、その岩礫や土砂をその場に置いてきます。その小山をモレーンといいます。ティンダル氷河の周辺には約 100 年 BP（1950 年より約 100 年前）に形成されたと推定されているルイスモレーンが分布し、さらに斜面下方に約 900 年前の氷河前進期に形成されたと考えられているティンダルモレーンが分布しています。

図 4 に示されているティンダル氷河の末端の位置をみると、過去 150 年間では氷河は後退する一方であることがわかります。そのため 150 年前以降の新しいモレーンは見られません。ティンダル・ターン（池）の東側などには、周辺の急崖から風化生産された岩屑がその基部に堆積した地形である崖錐（がいすい）が見られます。崖錐は、不安定な岩屑からなる斜面のために植物の定着は乏しいです。モレーンの斜面下方には土石流や氷河の融雪水が運搬・堆積した地形であるアウトウオッシュ（氷河融解水流）性の扇状地が見られます。

氷河が融けて地表が現れた場所に最初に生育できる種は、キク科キオン属のセネキオ・ケニオフィトゥムです（図 5）。黄色い花を咲かせ、タンポポのような種子を付けて、その種子は風で散布されます。種子が地面に落ちて発芽・定着できるかどうかは地面の条件によります。

熱帯高山は 1 日の気温変化が激しいです。図 6 は、2011 年 8 月 31 日～9 月 3 日にティンダル氷河末端付近（4,580m）で観測した気温のグラフですが、天気の良い 8 月 31 日から 9 月 1 日にかけては、日中は気温が 10℃以上に上昇していますが、夜中は零下になります。したがって、地面が 1 日の間に凍ったり解けたりします。地面が凍ったり解けたりする作用を凍結融解（凍結）作用といいます。この作用が大きく働く場所では、地表を覆う岩屑が移動をし、地表が不安定になります。

氷河周辺の凍結融解作用が活発な環境を周氷河環境といいます。ここでは、雪や氷が日中に溶けて岩盤の割れ目に水が染み込み、夜中にそれが凍って割れ目を広げて岩屑が生産されたり、凍結融解作用や霜柱などで地表の岩屑が移動したりします。そのような周氷河環境では不安定な地表に種子が落ちても、発芽することが困難になります。しかし、岩盤の割れ目などに、岩盤が風化してできた細粒物質が溜まっていくと、そこで水分が保持され、また岩盤は移動せず地表が安定しているため、種子が散布されたときに発芽しやすくなります。

氷河が融けて、新たに露出した地表で、種子の発芽にとって条件のよい場所に種子が散布されると植物が生育できます。そして、氷河の後退とともに植物の分布が斜面上方に拡大していきます。

図 7 は、1958 年から 2009 年まで、氷河の末端の位置と、第 1 の先駆的植物種セネキオ・ケニオフィトゥムの分布の上限の位置を示しています。この図が示すように、氷河が後退すると植物はどんどん山の斜面を登っていきます。この種だけでなく、他に、いわゆるコケと呼ばれている苔蘚類や、菌類と藻類が共生している地衣類、アブラナ科の植物、イネ科植物、カヤツリグサ科植物などが、氷河の後退とともに山の斜面を登っています。



## 図と表のページ

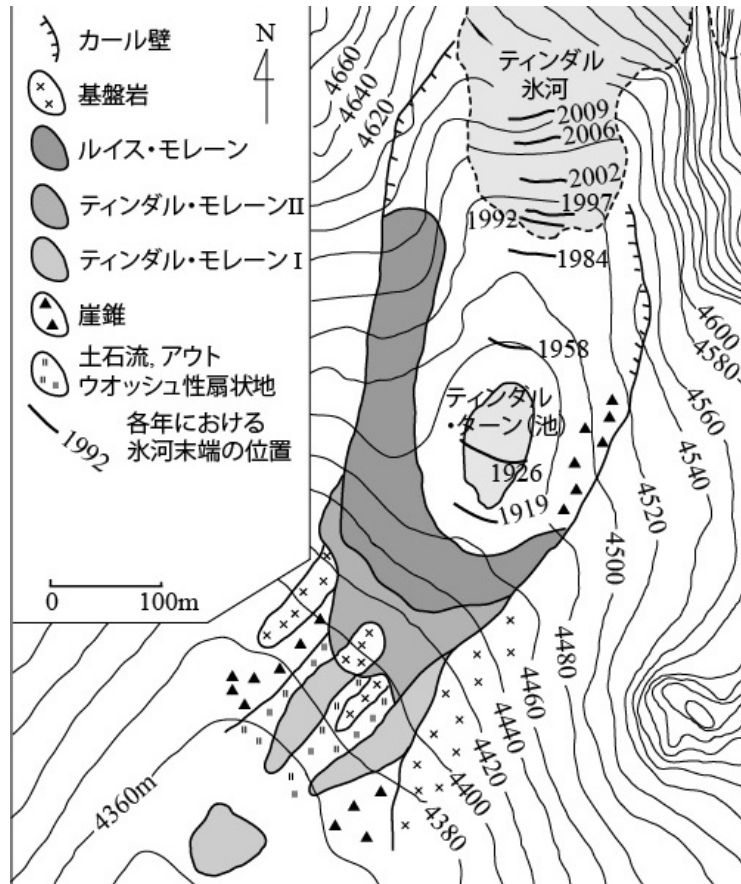


図4 ケニア山、ティンダル氷河周辺の地形学図(水野, 2003). ティンダル氷河末端の位置-1919, 1926: Hastenrath (1984); 1950, 1958: Charnley (1959). ルイスモレーンとティンダルモレーンの名称は, Mahaney (1984; 1989)および Mahaney and Spence (1989)に基づく.



図5 氷河融解後、最初に生育できる第一の先駆的植物種のセネキオ・ケニオフィトゥム  
(撮影: 水野一晴)

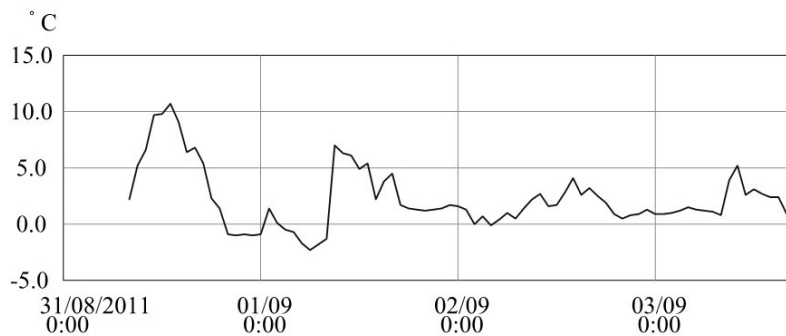


図6 ケニア山ティンダル氷河末端付近の気温(4,580m, 2011年8月31日~9月3日)(観測データより水野作成)

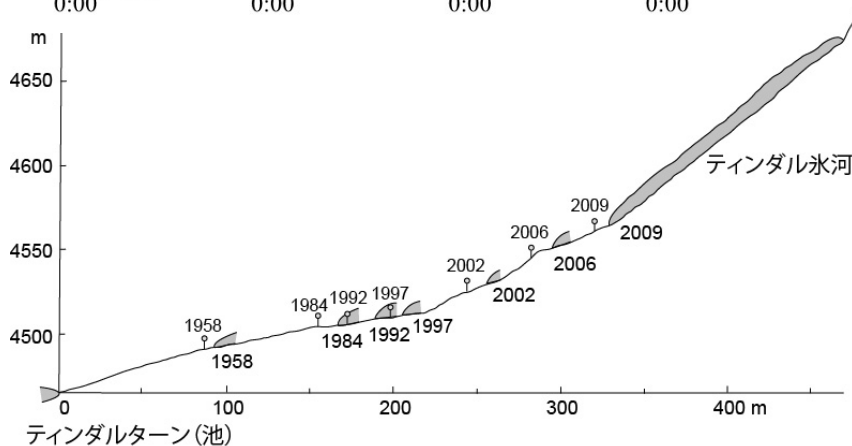


図7 ケニア山ティンダル氷河の後退と植物の遷移(Mizuno and Fujita 2014).

1958年から2009年までの氷河末端の位置と第一の先駆種セネキオ・ケニオフィトゥムの最前線の位置(植物の分布範囲のうち氷河末端に一番近い個体の位置). (1958年のデータは Coe 1967より, 1984年のデータは Spence 1989より引用)

### (3) 植生の遷移と土壌の発達を理解する。

岩盤の割れ目に細粒物質がたまって、そこで水分が保持されているような、まだ多くの植物が生育するには困難な土壌条件の場所に、先駆的植物種は侵入していきます (図 8)。先駆的植物種が枯れて腐った腐植が堆積していくにつれ、腐植の有機物が栄養分となり、土壌が発達していきます。土壌の粒子も風化の進行で細かくなっていき、腐植の堆積で土壌の色も黒くなっていきます。そして、より多くの植物が生育できる環境に変化していくのです。

氷河から解放されて 100 年以上たつと、大型半木本性ロゼット型植物であるキク科のセネキオ・ケニオデンドロンやキキョウ科のロベリア・テレキイが生育できるようになります (図 9)。セネキオ・ケニオデンドロンのような大型のセネシオはジャイアントセネシオ (Senecio は学名ではラテン語読みのセネキオ、通称名は英語読みのセネシオ)、ロベリア・テレキイのような大型のロベリアはジャイアントロベリアと一般的に呼ばれています。

### (4) 温暖化と植生の遷移を理解する。

2006 年までティンダル・ターン (池) (図 4) の北端より斜面上方には生育していなかったムギワラギクの仲間ヘリクリスム・シトリスピヌム (図 10) が、2009 年にはティンダル・ターン北端より上方の、ラテラルモレーン (氷河の側方に形成されるモレーン) 上に 32 株が分布していました。これは、近年の氷河後退にともなう植物分布の前進ではなく、気温上昇による植物分布の高標高への拡大と推定されます。

ヘリクリスム・シトリスピヌムは、通常暖かくなる 12-2 月に開花する植物ですが、2009 年には 8 月に開花していました。これは 2009 年の 3-9 月の気温が平年より 1℃以上高かったため、一気に生育範囲が斜面上方に広がり、2009 年の 4-8 月の気温が、平年の 12 月並の暖かい気温に達したため、8 月に開花したものと推定されます。気温が平年値であった 2011 年 8 月には、ヘリクリスム・シトリスピヌムは 49 株 (プラス 17 株) に増えていたものの、つぼみを持つものが 1 株あったのみで他は開花していませんでした。

また、大型の半木本性ロゼット型植物であるセネキオ・ケニオデンドロンの分布は 1958-1997 年には斜面上方に拡大するという傾向は見られませんでした。1997-2011 年には斜面上方に拡大して、山の斜面を登っていきました。氷河後退がこの植物種の遷移に直接関係しているとは考えられませんが、先駆種の斜面上方への拡大による土壌条件の改善と温暖化がジャイアントセネシオの生育環境を斜面上方に拡大させていると考えられます。

#### 参照 URL (2024 年 3 月 1 日 参照確認)

水野一晴の現在の研究活動

<https://kazuharumizuno.wixsite.com/mysite/blank-3>

#### 参考文献

水野一晴 (2023) : 『地理学者、発見と出会いを求めて世界を行く!』 (ちくま文庫) 筑摩書房, 368 頁.

水野一晴 (2021) : 『世界と日本の地理の謎を解く』 (PHP 新書) PHP 研究所, 264 頁.

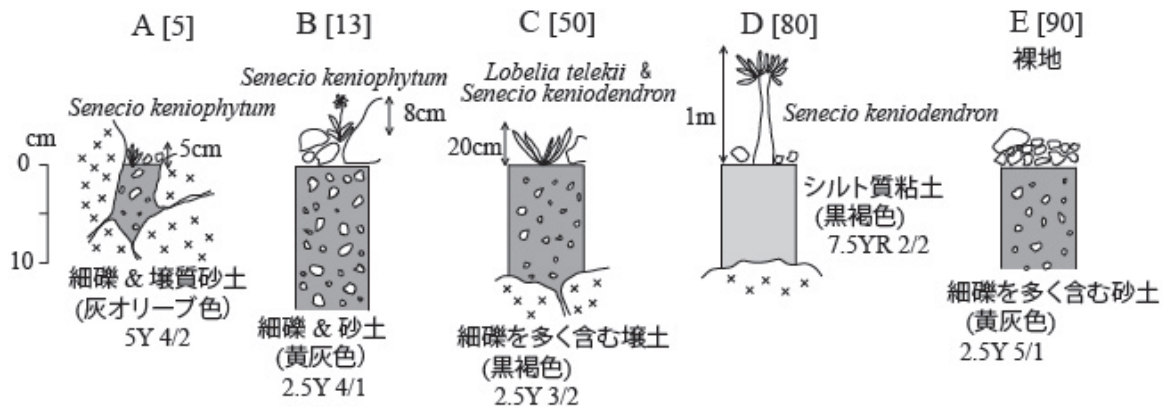
水野一晴 (2021) : 『自然のしくみがわかる地理学入門』 (角川ソフィア文庫) KADOKAWA, 256 頁.

水野一晴 (2016) : 『気候変動で読む地球史—限界地帯の自然と植生から—』 (NHK ブックス) NHK 出版, 285 頁.

水野一晴 (2015) : 『自然のしくみがわかる地理学入門』 ベレ出版, 256 頁.



## 図と表のページ



[ ]: 各調査地点の堆積物(土壌)の年代(年)(氷河の後退速度と各調査地点の氷河末端からの距離から求めた)

図8 各調査地点(図4-1)での土壌断面図(Mizuno, K., 1998)



図9 叢生するイネ科草本の中に生育している大型木本性ロゼット型植物セネキオ・ケニオデンドロン(キク科)とロベリア・テレキ(キキョウ科)。

このような大型のセネキオ・ケニオデンドロンとロベリア・テレキは、それぞれ、一般にジャイアント・セネシオとジャイアント・ロベリアと呼ばれている。(撮影: 水野一晴)



図10 ムギワラギクの仲間ヘリクリスム・シトリスピヌム。

2006年までティンダル・ターン(池)の北端より斜面上方には生育していなかったが、2009年にはラテラルモレーン上に32株が分布していた。

花びらのように見える白い部分は葉の変形したほう葉で、花弁は真ん中の黄色い部分。ほう葉がドライフラワーのように乾燥しているためEverlasting Flower 永久花と呼ばれている。(撮影: 水野一晴)