

## 赤道高山の縮小する氷河

## Shrinking Glaciers on Equatorial Mountaintops

岩田修二\*

Shuji IWATA

**Abstract:** High equatorial mountains, the Rwenzori Mountains, Mount Kenya, and Mount Kilimanjaro in East Africa; the mountains of New Guinea; and the Ecuador Andes, have been studied by many ecologists, glaciologists, and geographers since the 1800s. In recent years, these mountains are faced environmental crises strongly. The sceneries in these mountains are characterized by peculiar vertical zonation, especially by alpine zones named such as Paramo in the Andes and Afro-Alpine landscapes in East Africa, and by cloud forests in the high tropical mountain zones. Tops of these mountains are covered with existing glaciers that are small valley glaciers, slope glaciers, and summit ice caps. These equatorial glaciers are shrinking rapidly and continuously. The glacier shrinkage in Ecuador has been accelerating since the 1970s, those on Puncak Jaya in the 1930s and 1940s, and in the 1970s and 1980s, and those on Kilimanjaro since 2000. The time space diagram shows that the glaciers of Africa and New Guinea will all disappear sometime between 2015 and 2030, and those of Chimborazo in Ecuador will disappear in 50 and 60 years and more.

**Key words:** 熱帯高山 (tropical high mountains), 垂直分布帯 (vertical zonation), 地球温暖化 (global warming), 氷河変動 (glacier fluctuations)

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>I はじめに</li> <li>II 熱帯と赤道高山</li> <li>III 熱帯高山の植物 (垂直分帯)</li> <li>IV 熱帯高山の性格 (気候と植生)             <ul style="list-style-type: none"> <li>1) 東アフリカ高山</li> <li>2) ニューギニアの高山</li> <li>3) エクアドル=アンデス</li> </ul> </li> <li>V 赤道高山の氷河             <ul style="list-style-type: none"> <li>1) 気候メーターとしての氷河 (氷河変動と気候変化との関係)</li> <li>2) 熱帯高山の氷河の特徴</li> <li>3) 氷河の縮小の実態</li> <li>4) 東アフリカの氷河</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>5) ニューギニア, ジャヤ山塊の氷河</li> <li>6) エクアドル=アンデスの氷河</li> <li>VI 熱帯の氷河の行く末</li> </ul> |
|--|---|

## I はじめに

地球温暖化によって地球環境の変化が地球上のさまざまな地点で起こっている。氷河の縮小もそのひとつである。熱帯地域にも氷河があり、それらは高山の頂上付近にある。これらの氷河も例外ではなく縮小している。とくに赤道高山の氷河はもともと小規模であったので、最近の縮小によって消滅寸前の状態にある。その実態はあまり知ら

\*立教大学観光学部・教授

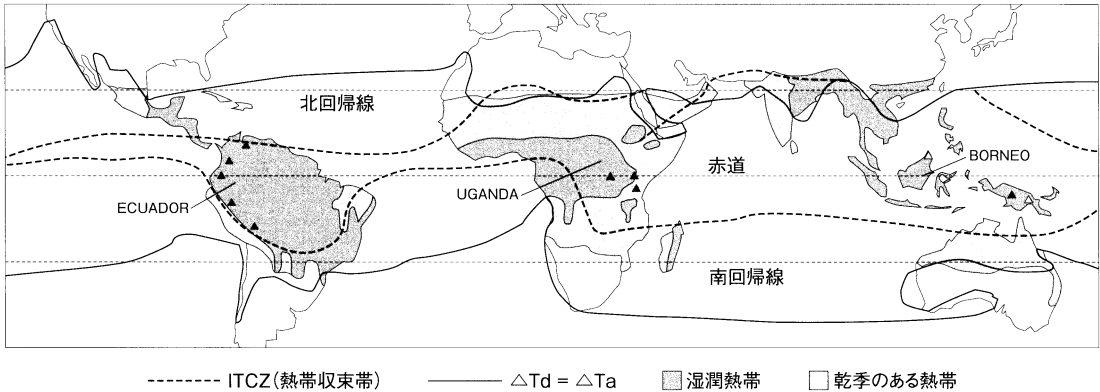


図1 熱帯環境をきめる要素と、湿潤熱帯と乾季のある熱帯の範囲。黒三角は氷河のある山、白三角は氷期に氷河があった山（一部の山）。Kaser and Osmaston (2002) の図に加筆した。

れていないようなので、最近の研究の成果をまとめてみた。文献資料をまとめただけでなくGoogle Earthの画像を用いて氷河範囲を地図にプロットして最近の氷河状態を確認した。まず、赤道高山の自然の構成について、垂直分帯を説明し、氷河の特徴と氷河変動についての研究を紹介する。なお、この報告は写真集『熱帯の水河』（水越 武：2009、山と溪谷社）に解説文として執筆したもの（146-157 ページ、文献リストは170 ページ）を転載したものである。また、末尾のカラー写真は今回の転載にあたってあらたに掲載した。

## II 熱帯と赤道高山

北回帰線（北緯 23°26′）と南回帰線（南緯 23°26′）にはさまれた地域を熱帯と呼ぶことはギリシャ時代から始まった。この緯度範囲では太陽はほとんど真上から射す。つまり、熱帯とは太陽が一年中頭上にある地域であり、したがって年中高温である。ただし、単に気温が高いというだけではなく、気温の日変化 ( $\Delta T_d$ ) が気温の年変化 ( $\Delta T_a$ ) より大きい地域ということが気候学的には強調される。あたためられた熱帯の大気は上昇し、上昇気流は雲を生み降雨をもたらす。そして上昇した空気を補うために南北から空気が流れ込む（大気が収束する）。空気が収束する場所を ITCZ（熱帯収束帯）<sup>1)</sup> という。ITCZ こそが気象

学的な赤道（熱帯の核心域）といえる。ITCZ は季節によって南北に移動するので降水域も移動する。ITCZ がその場に存在する期間の長さや時期によって一年中多雨な「湿潤熱帯」と、降水に乏しい季節がある「乾季のある熱帯」とが分かれる（図1）。

熱帯にも高い山岳がある。アフリカ大陸では東アフリカの高山とエチオピア高原、東南アジア・オセアニアではニューギニアとボルネオ、中南米のメキシコ高原の火山、ニカラグアの山岳、ベネズエラや、コロンビア、エクアドル、ペルーのアンデス山脈が熱帯高山といわれる。あとでのべるように、熱帯高山の環境は温帯や寒帯の高山とは大きく異なっているので、世界の他の山やまから熱帯高山として区別できる。これらの熱帯高山の中から、Troll (1972) は赤道直下にあるものごとくに区別して赤道高山と呼んだ。東アフリカのルウェンゾリ、ケニア山、キリマンジャロ、アジア・オセアニアのニューギニアやボルネオの山地、エクアドル＝アンデスの山やまでである。これらはキリマンジャロを除いて湿潤熱帯に属している。以下では熱帯高山の中でも、温帯・寒帯の山岳との違いがとくに大きい赤道高山を中心にあつかう。

## III 熱帯高山の植物（垂直分帯）

熱帯の高山が認識されたのは、18 世紀末から

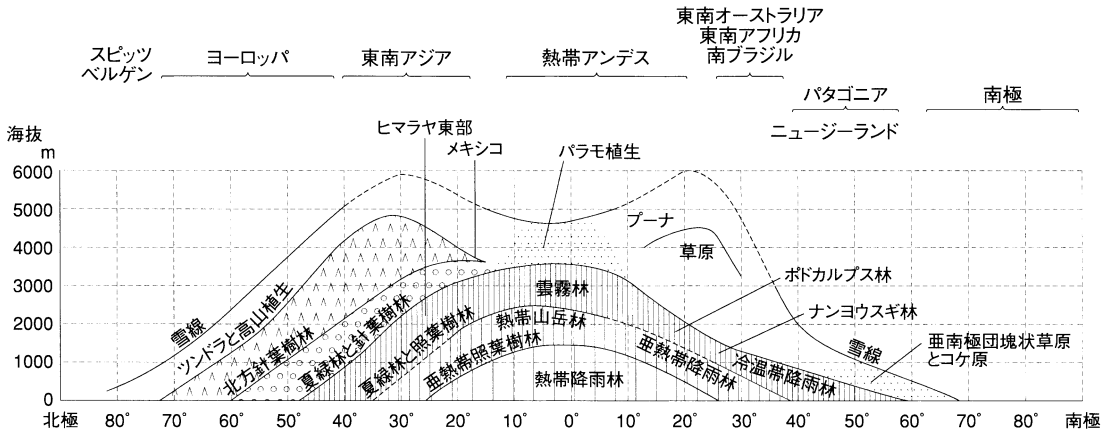


図2 地球の植生分布の鉛直南北断面。水平方向への変化と高さ方向への変化とが並行的である。トロール (Troll) の有名な図 (シュミットヒューゼン, 1968 の図 82 による)。

19世紀はじめにおこなわれたフンボルト<sup>2)</sup>の南アメリカ大陸の山地での観察にまでさかのぼることができる。フンボルトは、地球表面の地理的現象が低緯度から高緯度に水平方向に変化するのと同じように、高山の自然諸現象が高さ方向に規則的に変化し、それは赤道から極への変化と並行的であることを見出した。ここでは、世界の高山をひろく歩き、高山帯の自然環境を研究したトロールが描いた図を示す (図2)。

1年中降雨があり季節変化が少ない湿潤熱帯山地の環境は、海洋性気候の環境とよく似ている。自然状態だと海岸から森林限界まで密度の高い常緑広葉樹におおわれる。平地には熱帯降雨林 (熱帯低地林) があり、その上部には熱帯山岳 (山地) 林 (熱帯下部山地林), さらにその上部には雲霧林 (cloud forest) や蘇林 (mossy forest) などとよばれる森林 (熱帯上部山地林) がある。熱帯山岳林は、平地の熱帯林より高さが低く、構造 (多層性) が単純である。雲霧林や蘇林は、一年中雲がかかる高度帯に位置するため、樹幹や枝などの大部分がコケや着生植物におおわれた不思議な様相である。

熱帯高山では森林限界以上も霧の多い過湿地帯で、温帯や寒帯の高山帯の景観とは全く異なっている。熱帯高山の高山帯も高山草原 (あるいはヒース帯または低木・草原帯) とよばれるが、中緯度や高緯度のお花畑や牧場のような草原帯とは景

観が大きく異なっている。タソック (tussock) とよばれる株立ち (ドーム状) のイネ科草本が群生し、広い部分が湿地になっているので湿原帯ともよばれる。そして、ここには木化した茎をもった5mに達するような巨大な植物 (大型木本性植物) が林立し、ほかにはない景観をつくっている。大型木本性植物は、赤道アフリカではロベリア属 (*Lobelia*: キキョウ科) とセネシオ属 (*Senecio*: キク科) (図3), ニューギニアでは木生シダ (高さ5-10mになる木化した幹をもつシダ) やセネシオ, 赤道アンデスではエスペレティア属 (*Espeletia*: キク科) の植物である。これらの多くは密生した毛や鱗状の樹皮などをもち、夜間の冷え込みから植物体を守る構造になっている。このような特異な景観から、普通の高山帯と区別するために、赤道アフリカの高山帯はアフロ=アルパイン, 赤道アンデスの高山帯はパラモ (paramo) と呼ばれている。熱帯の高山帯の景観が温帯・寒帯と大きく違ってくる原因は、1) 強風が吹かないので植物の丈が高くなること, 2) 雪の吹きだまりもできず、均一な積雪は昼間の日射ですぐに融けたり昇華蒸発したりするので、植生が均一な分布になりやすいことである。高山草原と雪線の間には、草本の先駆群落 (クッション植物やロゼット植物) や地衣類がまばらに分布する寒冷荒原がある。この荒原には、雪線以上の雪氷域から伸びてきた氷河末端 (氷河消耗域) が分布する。



図3 赤道熱帯山地の高山草原（ヒース低木帯）を特徴づける大型木本性植物。高さ5mくらいになる。キリマンジャロの場合。左：ジャイアント=ロベリア，右：ジャイアント=セネシオ（Snelson, 1987）。

#### IV 熱帯高山の性格（気候と植生）

##### 1) 東アフリカ高山

東アフリカのケニア，タンザニア，ウガンダの3国境会合点にあるビクトリア湖をはさんで，赤道上にあるのがルウェンゾリとケニア山，東経37°線上に南北に並ぶのがケニア山とキリマンジャロである（図4）。いずれも頂上付近に年年やせ細りつつある氷河を残している。キリマンジャロ（5895 m）は海拔高度6000 m近い新しい火山であるが，ケニア山（5199 m）とルウェンゾリ（5109 m）は5000 mを少し超える険しい岩山で，山容は似ているものの成因は異なる。ルウェンゾリは300万年前に隆起した花崗岩類の山地で4500 mを超える五つの山塊が4000 mの台地上にそびえている。ケニア山はルウェンゾリの隆起と同じ頃に噴火した火山であるが，長い年月の間に侵食されて，火道を満たした堅い溶岩が岩峰を形成している。

ルウェンゾリとケニア山は湿潤熱帯に，キリマンジャロは湿潤熱帯と乾季のある熱帯との境界に位置するが，いずれも2回の雨季と2回の降水量

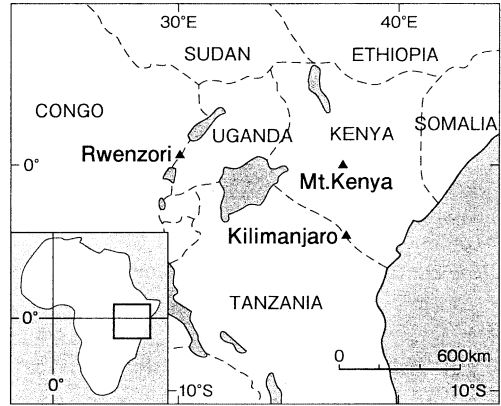


図4 アフリカで現存氷河のある赤道高山，ルウェンゾリ，ケニア山，キリマンジャロの位置。

の少ない季節とが明瞭である。このような季節変化が起こるのはITCZの南北方向の振幅（移動）による（図1）。1月から2月にかけては，ITCZが南にあり北アフリカの乾燥気団に支配され降水量は少ない。3月から5月はITCZが北上し通過するため湿潤気団におおわれ，インド洋からの北東風とコンゴ盆地からの南東風が湿気をもたらす，降水量がピークとなる。6月～8月はITCZが北に離れているため，乾燥した南東風に支配される。9月～12月にはITCZの南下・通過にともなう湿潤気団におおわれ，南東のコンゴ盆地と北東のインド洋から湿った空気が流入し，2番目の降雨ピークになる。

このほかに日周の局地的積雲対流，つまり山腹の上昇気流による午後の積雲の発達によって午後には降水がある。この降水は氷河涵養に有効である。ただし図5に示したように山頂が平らで広いキリマンジャロでは積雲が収束せず対流セルが大きくなる。さらに湿気をもたらす卓越風の高さより山頂が高く湿気の供給を受けにくい。このような理由でキリマンジャロの山頂は降水量が少ない。これに対して湿潤熱帯の中心にあるルウェンゾリでは，低所ではやや乾燥する2-3月でも4500 m以上の高所では降水が多い。

アフリカの高山では高度による気候の変化（垂直分布）もよく研究されている。Kaser and Osmaston (2002: 65-66)によると，ルウェンゾリの山体周囲の大気の気温0°Cレベルは高度4600-

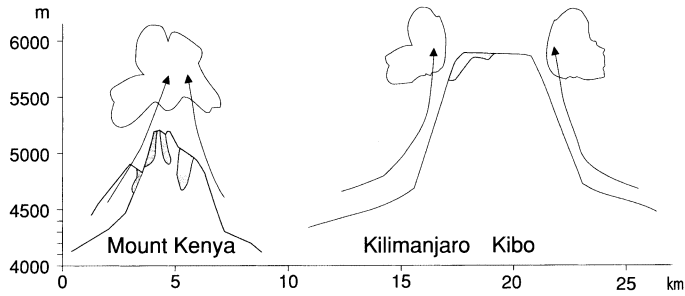


図5 東アフリカのケニア山（左）とキリマンジャロ（右）の局地的な積雲対流パターンのちがい。とんがった山頂のケニア山では対流のセルがあわさって積雲が発達する。6000 m 近いキボ峰は ITCZ に吹き込む風系（貿易風帯）より高く、山頂の面積が広いので積雲が収束せず、上昇気流による降水がすくない。影をつけてるのは氷河（Kaser and Osmaston, 2002 の図 8.2.2 による）。

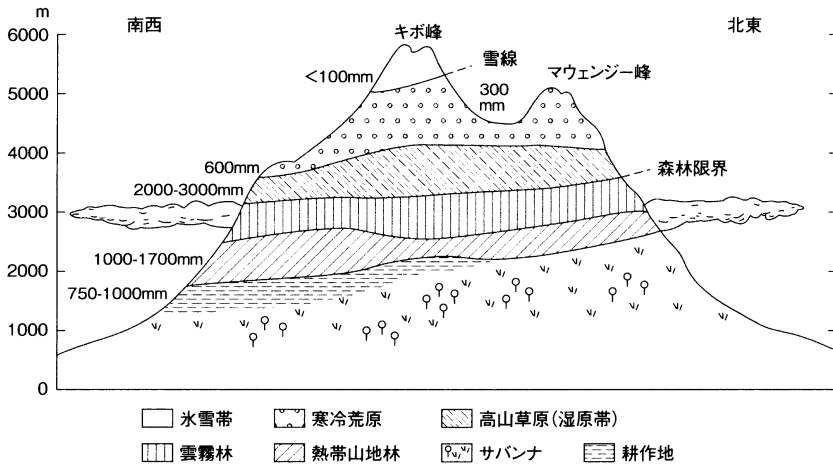


図6 キリマンジャロの植生帯・景観帯の高度分布と年降水量（水野，1999 の図 10-2 による）。

4700 m, 降水量が多い高度帯は 1500–3500 m で年間降水量 2500 mm を超える。このような高度による気候変化は植生・景観の高さ方向の変化に反映する。図6にキリマンジャロの景観の垂直分布の模式図を示す。山麓はサバンナなので、森林限界はサバンナの上限（熱帯山地林下限）にもある。つまり、高山帯下限とあわせて森林限界が二つある。南西側からの湿気の供給が多いので森林限界も雪線も南西側に傾いている（低下している）。キリマンジャロの山体を撮った写真の大部分は森林限界以上の高山草原・湿原帯・寒冷高原部分で撮られたものである。高山草原・湿地帯（アフロ

=アルパイン）では、すでに述べたように巨大化したロベリアやセネシオが分布し特異な植生景観を見せる。

ルウェンゾリとケニア山も植生の高度分布ほぼ同じようである。ただし、降水量がキリマンジャロより多いので、雪線は低く（いずれも 4500 m）、森林限界は高い（3500 m～4000 m）。そして雲霧林の下部には林冠の高さ 10～15 m のタケ（竹林）がある。ルウェンゾリでは山体の方向による景観・高度帯の変化は少ないが、ケニア山では南面は湿潤であるが、北面は非常に乾燥した景観である。

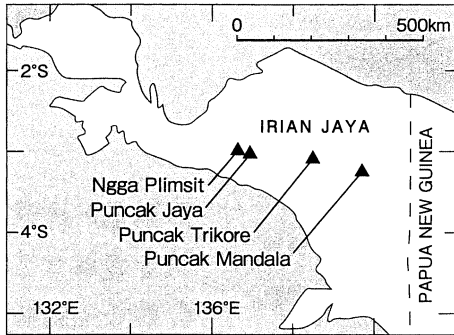


図7 ニューギニア島イリアン=ジャヤの高山。ジャヤ山塊 (Puncak Jaya) 以外の山の氷河は20世紀になってから消滅した (Hastenrath, 2008)。

## 2) ニューギニアの高山

ニューギニア島を東西に走る脊梁山脈の西半分はマウケ山脈 Maoke Range と呼ばれている。インドネシアのイリアン=ジャヤ県である。この山脈の最も高い部分がジャヤ山塊<sup>3)</sup>で、赤道から南へ約400 kmの南緯4°04′，東経137°10′付近に位置する(図7)。ここには、マウケ山脈の他の山<sup>4)</sup>では消滅してしまった氷河がまだかろうじて残っている。

湿潤熱帯の気候を反映して、ニューギニアの高山の気候の年変化は極めて小さい。月平均気温の最高値と最低値の差は1°C以下であり、雲量・降水量・日射量などの季節変化もほとんどない (Hope et al., 1976)。植生・景観帯の垂直分布帯は低所から、熱帯山岳林、亜高山森林、亜高山草原・湿地、高山群落、岩壁、雪氷域となっており (Hope et al., 1976の図8.1)、亜高山森林にはタケ林がある。亜高山草原には、大型木本植物として、茎が木化して幹となり高さが5～10 mとなった木生シダが広く分布する。

## 3) エクアドル=アンデス

赤道直下のエクアドルの低地の自然植生は、太平洋側の北半分は熱帯降雨林、南半分はサバンナ、アマゾン側では熱帯降雨林である。国の中央を南北に、アンデス山脈の東山脈(コルディエラ=オリエンタル)と西山脈(コルディエラ=オクシデンタル)が並走し、4000～6000 m級の氷河を戴

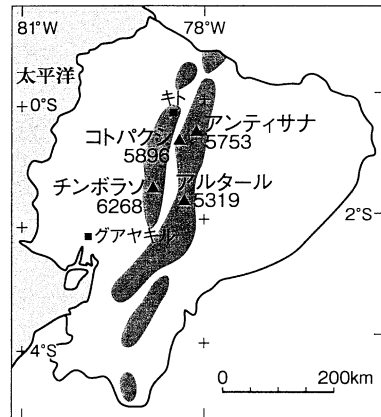


図8 エクアドルの、氷河のある代表的な火山。東西2列のアンデス山脈が国の中央を走っている。網掛け部分は3000 m以上の場所。

いた山やま(その多くは新しい火山)が連なっている(図8)。山脈のアマゾン側の斜面は、3500 m付近の森林限界まで熱帯林に覆われ、森林限界直下は雲霧林である。森林限界以上のパラモにはキク科エスペレティア属の高さ3 mほどになる多年生低木がある。パラモの上半には植生のまばらな寒冷荒原がひろがる。両山脈の間には海拔高度2500 m前後の盆地や広い谷が連続し、やや乾燥し、シエラ(山岳)地域と呼ばれる。

シエラには耕地がひろがり(図9)、4～9月が乾季、10月から翌年の3月が雨季にあたる。アンデス山脈の高山はシエラより降水量が多く、とくに東山脈ではアマゾン側からの湿気によって4月から9月にも多量の降水がある。これを反映して雪線(氷河平衡線)は東に傾いている。雪線の高さは東山脈東面で約4500 m、西山脈西面では4900 m前後になる。

## V 赤道高山の氷河

### 1) 気候メーターとしての氷河(氷河変動と気候変化との関係)

氷河とは、地球表面にあって連続して運動する(流動する)水体である。その大きな特徴は気候(気温や降水量)の変化に対応して大きさを変える(体積が変化すること)である。氷河体積の大

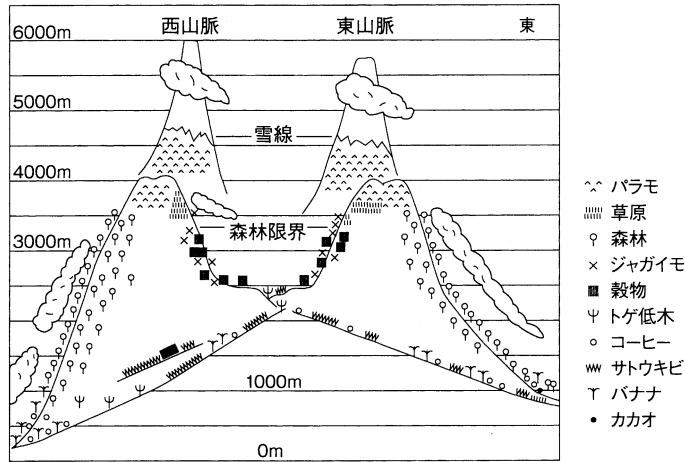


図9 エクアドル＝アンデスの東西断面と景観（農業を含む）の高度分布模式図。Müller-Hohenstein (1979) の図22 から作成した。雪線が東に傾いていることに注意。

部分をしめる氷は、積み重なった積雪が圧力や融解再凍結などによって氷に変化したものである。したがって氷河の体積変化とは氷の量の変化のことである。降雪による氷の追加（収入）と融解などによる氷の損失（支出）のバランスで体積が決まるので、会計収支になぞらえて氷河質量収支<sup>5)</sup>という。収入を涵養，支出を消耗という。ひとつの氷河のなかで、涵養量が消耗量より大きくなれば氷河体積は増大し、逆になれば体積は小さくなる。体積の増・減は氷河の末端（前面）の前進・後退に反映する。世界各地で報告されている「氷河後退（体積減小）」は氷河質量収支のマイナスを意味するのである。

谷氷河に代表される山岳氷河では高度のある上流部に雪が降り積もり涵養され、下流部で融解が起こり消耗する。したがって上流部を涵養域、下流部を消耗域といい、この二つの領域の境界線を、釣り合い部分の境界という意味で氷河平衡線という。多くの場合、氷河平衡線は、積雪に覆われた涵養域と、氷河水が露出した消耗域の境にほぼ一致する。これは、氷河域以外の山地斜面の雪氷域と非雪氷域（岩壁やガラ場）との境（雪線）とほぼ一致する<sup>6)</sup>。

温暖化（気温の上昇）は氷河の融解を増し、雪線の上昇、すなわち降雪域（涵養域）の縮小をもたらすから氷河は小さくなり、寒冷化（気温の低

下）は融解を減らし、積雪域を広くするので氷河は大きくなると一般的には考えられる。しかし話はそう簡単ではない。温暖化によって気温が上昇すると、大気中に含まれる水蒸気量が増える。水蒸気量が増えて降水量の増加（積雪量の増加）がおこれば氷河は大きくなるし、雲が増えて日射が遮られると融解が抑制され氷河は大きくなる。一方、氷河水の温度が0℃よりも低いとき、大気中の水蒸気は氷に触れて凝固し氷河量を増加させるが、そのときに発生する熱（凝固熱）によって水温は0℃となり氷は融けやすくなる。このように、気候と氷河質量収支との関係は単純ではない。したがって、気候変動と氷河変動との関係を知るためには、長期間にわたる氷河質量収支観測を行い、その結果を気象観測データと照合せねばならない。とはいえ、氷河は気候変動をかなり忠実に反映すると考えられている。氷河を気候メーターと呼ぶ研究者がいるほどである。

## 2) 熱帯高山の氷河の特徴

熱帯の高山にも氷河が存在する。氷河が現存するのは、東アフリカの三つの高山、ニューギニア島イリアン＝ジャヤのジャヤ山塊、南アメリカ大陸アンデス山脈のベネズエラからボリビアまでのアンデス山脈である（図1）。これらの部分における氷河の総面積はおよそ2,500 km<sup>2</sup>（1990年）

に達するが、世界の山岳氷河面積の4%、世界の氷河面積の0.15%を占めるに過ぎない(WGMS, 1989)。赤道直下にある氷河だけに限定すると、東アフリカ、エクアドル＝アンデス、ニューギニアだけになり、合計しても123 km<sup>2</sup>、世界の山岳氷河面積の0.2%、世界の氷河面積の0.07%を占めるだけになってしまう。

熱帯の氷河は小規模ではあるが美しい。年中降雪がある涵養域は純白の新雪におおわれる。消耗域では日中融解した水が夜間に凍結してつららや透明氷が陽に輝く。6000 m近いキリマンジャロのキボ峰や、チンボラソの頂上付近では、高度が高く気温が低いので雪や氷は融解せず(水にならず)、しかし日射は強烈なので昇華蒸発によって雪氷は消耗する。氷河の表面にはサンカップとよばれる窪みが一面にでき、発達すると密集した氷柱群が形成される。鉛直な氷壁が維持され後退する。たえず激しい消耗にさらされている熱帯の氷河の消耗域(氷舌)は温帯や寒帯の氷河末端に比べてやせ細った形をしているのが普通である。

1990年代以後、世界中の山岳氷河が大きく後退していることが明らかになった。とりわけ、熱帯の氷河が大きく縮小していることが注目されている(IPCC, 2007)。熱帯の氷河がどんどん縮小している理由(要点)を説明しよう。気温の年較差が大きい温帯・寒帯の氷河は、寒冷な季節の降雪によって涵養され、高温の夏に消耗する。一方、気温の年較差が小さく一年中降水がある湿潤熱帯の氷河では涵養と消耗とが同時に一年中起きている。乾季のある熱帯でも、涵養が起こるのは雨季だけであるが消耗は一年中起きている(図10)。それにもかかわらず熱帯に氷河が存在できるのは、消耗と釣り合った多量の積雪によって氷河質量が維持されているからである。冬、温帯や寒帯の氷河は氷河下流域まで降雪に覆われる。冬は気温が低く、そこでは多少の気温上昇は氷河の積雪域の面積変化には影響しない。氷河は同じ量の降雪を受け取ることができる。一方、気温の年変化が小さく一年中降雪がある熱帯の氷河では、氷河の中流ですら氷河は一年中、氷河存在限界ぎりぎりの温度環境にある。つまり熱帯の氷河の積雪域下限は一年中氷河中流域にあり、年中、融解

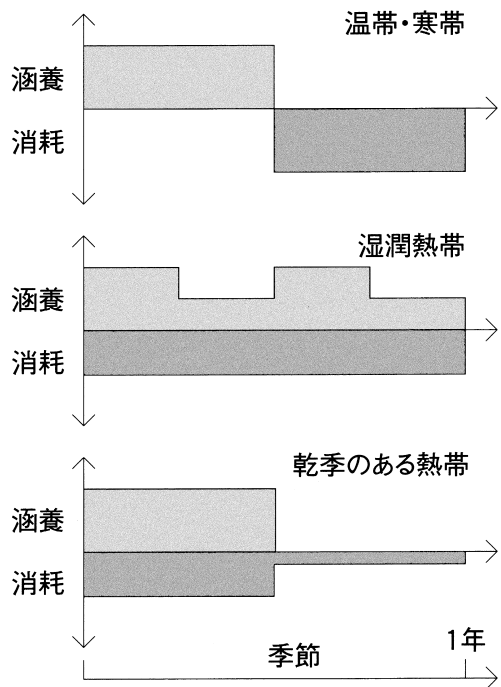


図10 湿潤熱帯と乾季のある熱帯、さらに温帯・寒帯における氷河の涵養と消耗の年間収支を模式的に示した。湿潤熱帯では1年中涵養と消耗が進み、乾季のある熱帯では1年中消耗が進むことに注意(Kaser and Osmaston, 2002: p. 25による)。

温度ぎりぎりに置かれている。したがって、少しの気温上昇によっても降雪は降雨にかわり、降雪域は著しく減少し、涵養量が激しく減少することになる。気温上昇による氷河末端の融解量の増加と共に、雪が雨に変わることが涵養量の急激な減少をひき起こす。これが熱帯の氷河縮小がはげしいことの主要な原因であると考えられている。

### 3) 氷河の縮小の実態

氷河のある熱帯高山の中でも、とくに氷河減少率が大きいのは、赤道直下の高山の氷河である。赤道高山の氷河は世界の3地域にしか残っていない。東アフリカ、ニューギニア、エクアドル＝アンデスである(図1)。世界中の氷河と同じように、赤道の氷河の後退も「小氷期」が終了した1850年ごろから始まった。これは、エクアドル＝アンデスでは歴史記録の検証から(Hastenrath, 2008)、ニューギニアでは地形・地質学的証拠と



数値モデルから (Hope et al., 1976) あきらかになっている。一方、東アフリカの氷河は、1880年代になってから後退を始めたと東アフリカの氷河を30年間研究しているウイスコンシン大学のハステンラスはのべている (Hastenrath, 2008)。それは、東アフリカの湖の突然の水位低下の時期と一致しているという。

アフリカとニューギニアの氷河については、白岩孝行 (1997: 263–272) の解説がある。『熱帯の氷河』(Kaser and Osmaston, 2002) には熱帯の氷河の氷河学的解説と、ペルー＝アンデスとルウェンゾリの氷河のくわしいモノグラフが書かれている。ハステンラスは東アフリカに加えて、赤道アンデスとニューギニアの3氷河地域の地図と写真記録をまとめた (Hastenrath, 2008)。以下では、これらを参考にして地域ごとの氷河縮小の実態を解説する。氷河の現状を知るためには Google Earth の3D画像、Google Map の地形図 (40 m 等高線)<sup>7)</sup> も有益であった。

#### 4) 東アフリカの氷河

更新世の氷河作用の名残であるモレーンやティール<sup>8)</sup> はほかの山からも発見されているが、現成の氷河はルエンゾリ、ケニア山、キリマンジャロ (キボ峰) の三つの山にしか存在していない (図4)。歴史的な情報と文献をふくむ関連情報はハステンラスの本 (Hastenrath, 1984) にくわしい。この3山の氷河面積は年々減少しているが、山ごとの合計氷河面積はキリマンジャロ、ルウェンゾリ、ケニア山の順に小さくなり、2000年の面積は、それぞれ  $3.5 \text{ km}^2$ 、 $2.5 \text{ km}^2$ 、 $1.5 \text{ km}^2$  と見積もられる (図17)。

#### ルウェンゾリ

ルウェンゾリは古くから「月の山」とよばれた幻の山であった。この山の発見者探検家スタンリーや初登頂者アブルツィ侯<sup>9)</sup> の名前や、「ゴリラのいるジャングルの奥の氷河の山」などの魅力的なフレーズによって、有名であったが実態はよく知られていなかった。ルエンゾリの山やまは流水や氷河によって侵食されて急な岩壁からなる小山塊に分かれている。これらの山塊は、最大のス

タンリー Stanley 山塊でも長さ5 km くらいの小規模な山塊で急な岩壁の集合体である。したがって形成されている氷河も、過去の拡大していた時はともかく、現在では岩壁に貼りついたような山腹氷河や懸垂氷河ばかりである。最大のエレナ Elena 氷河でも長さ1.2 km ほどしかないが、この氷河の源頭はやや傾斜の緩いスタンリー＝プラトーと呼ばれる氷原になっている。スタンリー山塊の最高峰マルゲリータ 5109 m はルエンゾリの最高峰で山塊の北東端にある。

図11にはルエンゾリのスタンリー山塊、スピーク Speke 山塊、ベイカー Baker 山塊の、1906年、1955年、1990年の氷河範囲を示した。図12には最大面積のエレナ Elena 氷河の1906年からの変動を、1952年、1956年、1960年の範囲をふくめて示した。エレナ氷河の1906年の面積 ( $0.315 \text{ km}^2$ ) を100%とすると、1990年には ( $0.113 \text{ km}^2$ ) 36%となった。

オスマストンのまとめ (Kaser and Osmaston, 2002: 111) によると、氷河範囲が最初に明らかになった1906年から、1930年代までの後退量は大きくはない。1930年代から1950年代に劇的な後退が起こったが、1960年代初めにはいくつかの氷河は前進した。その後、1970年代までにさらに後退し、それ以来氷河はいちじるしく縮小した。多くの写真を比較すると、氷河の縮小・消滅は氷河の末端ばかりではなく、山頂近くの氷河涵養域でもおこっている。

スタンリー山塊の氷河面積の縮小率は1906年を100%とすると、1955年には66%、1990年には35%になってしまった。これにスピーク山塊とベイカー山塊の氷河面積を合計したもので比較すると、1906年100%、1955年59%、1990年26%となる (Kaser and Osmaston, 2002: 84)。このような氷河の縮小は降水量の減少より気温の上昇の影響であるという (Taylor et al., 2006)。この調子で氷河が縮小しつづけると面積が0%になるのは2025年頃であろう。

#### ケニア山

赤道山地の氷河の中でケニア山の氷河は、連続的な氷河情報がよくそろっており、氷河縮小の過

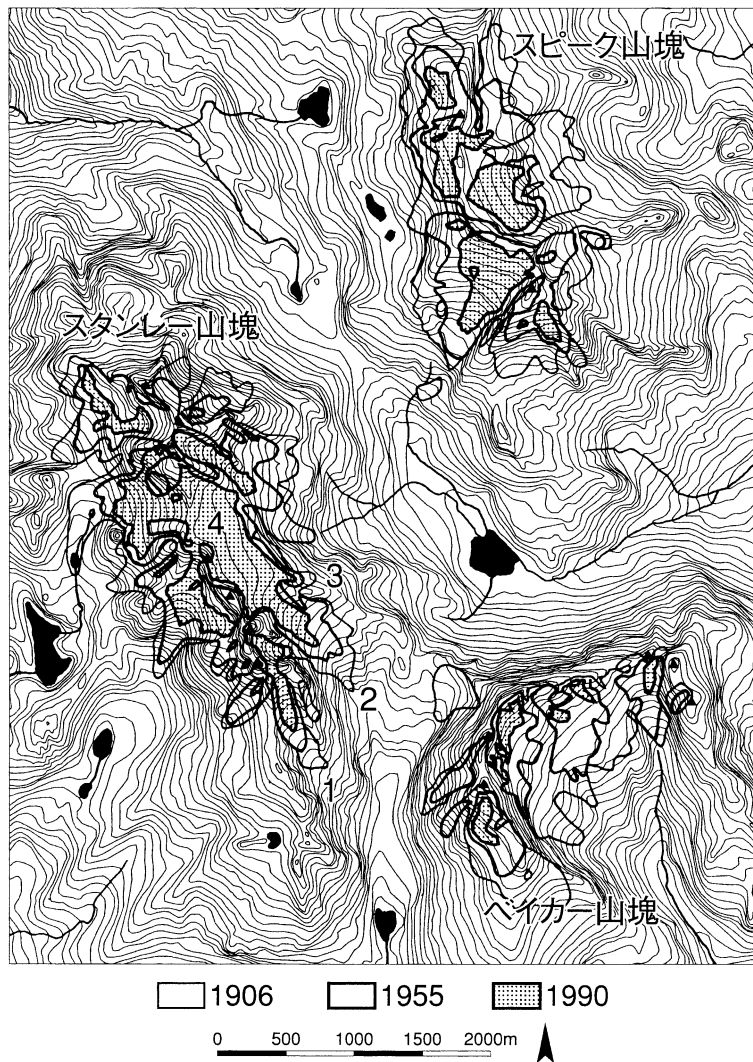


図11 1906年から1990年までのルウェンゾリのスピーク山塊、スタンレー山塊、ベイカー山塊の氷河範囲（氷河縮小をしめす）。1: サボイ Savoia 氷河, 2: エレナ Elena 氷河, 3: 東スタンレー East Stanley 氷河, 4: スタンレー=プラトー. Kaser and Osmaston (2002) の図6.1.1., 6.4.5., 6.5.6., 6.6.4. から作成した。等高線間隔は100フィート、氷河表面の等高線は1955年の氷河表面を示す。

程がよくわかっている。19世紀末から2004年までの氷河範囲の変化を図13に示した。現在では、ケニア山の氷河は、谷氷河やカール（圏谷）氷河というよりも岩壁の凹地やルンゼに残ったニッチ niche 氷河というべき小規模なものである。19世紀末に存在した18の氷体のうち8氷体が消滅したことも明らかになっている（Hastenrath, 2005, 2008）。この図でもピゴット北西氷河やシザール

氷河は1920年代に消滅したことがわかる。現在（2004年）、氷河が分布する範囲は1.5 km 四方に入ってしまうほど狭い。ほかの赤道高山と比べても極端に氷河面積が小さいことに注意されたい。最大のルイス氷河でも長さ600 m, 幅250 mにすぎない。これは夏の終わりの日本アルプスの雪渓より小さいくらいである。ノーゼイ Northey 氷河は長さ60～70 m しかなく単なる氷塊に過ぎな

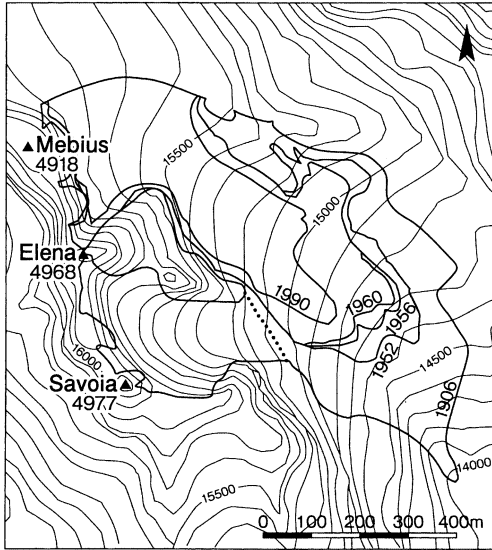


図12 ルウェンゾリ, エレナ Elena 氷河範囲の時系列変化. 点線はコロネーション Coronation 氷河との境界. 等高線間隔は 100 フィート, 氷河表面の等高線は 1955 年の氷河表面を示す. 源頭のエレナ峰は海拔 4968 m (Kaser and Osmaston, 2002 の図 6.7.6. による).

い. これらの小規模な氷河を表現するためには大縮尺の地図を使わざるを得ず, 他の山地で用いた Google Map の地形図にプロットすることもできなかった.

アクセスがよいケニア山では氷河学的な調査(氷河の質量収支と熱収支観測)がしばしばおこなわれている. その結果によると, 氷河の縮小は, 降水量の減少や日射増大・雲量減少とは結びつかず, 気温上昇による長波放射の増大, 大気からの顕熱輸送(熱伝導)の増大など, すなわち大気の温室効果が働いていると考えられている(白岩, 1997). ティンダル氷河の末端近くでは, 急速な氷河の後退を追いかけるように植物が裸地に侵入している. 京都大学の水野一晴は, その過程を丹念に追いかけている(写真1, 水野, 2003 など).

### キリマンジャロ

このアフリカの最高峰キボ峰の氷河分布とその 1912 年から 2000 年までの変化を図 14 にしめした. 1912 年, 1953 年, 2000 年の氷河範囲が示し

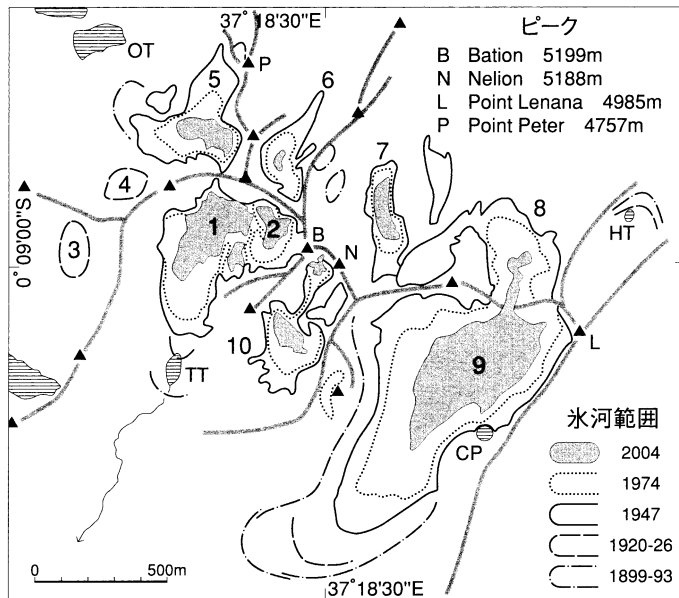


図13 1890年代から2004年までのケニア山の氷河縮小. 1: ティンダル Tyndall 氷河, 2: Forel 氷河, 3: Barlow 氷河, 4: NW Pigott 氷河, 5: Cesar 氷河, 6: Northey 氷河, 7: Diamond 氷河, 8: Gregory 氷河, 9: ルイス Lewis 氷河, 10: ダーウィン Darwin 氷河. 池: CP: Curling Pond, TT: Tyndall Tarn, OT: Oblong Tarn, HT: Harris Tarn. Hastenrath, 2008 の地図 1.1.6. 地図 1.1.7. から作成した.

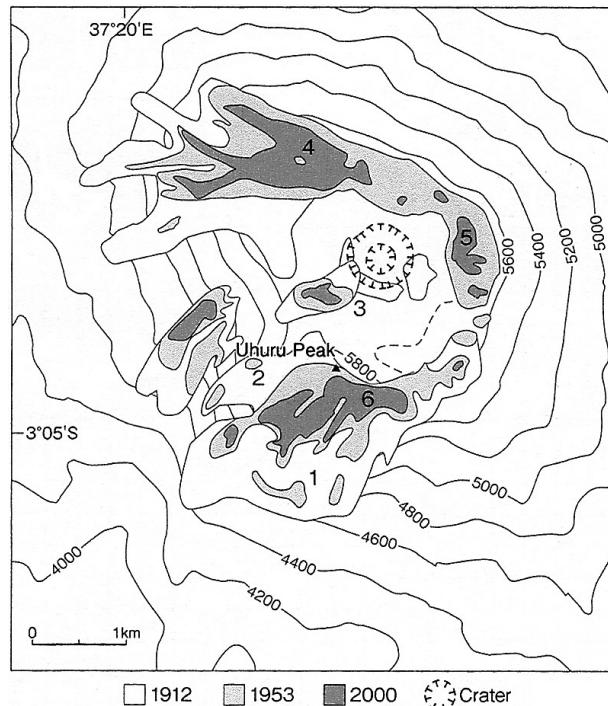


図14 1912年から2000年までのキリマンジャロ、キボ峰の氷河縮小。U: ウフル=ピーク (5895 m), 1: カーステン氷河, 2: ダイヤモンド氷河, 3: クレーターの氷河 (Furtwangler 氷河), 4: 北氷原, 5: 東氷原, 6: 南氷原。Google Map の地形図に Hastenrath, 2008 の地図 1.2.7. を重ねた。

である。1912年には氷河は山頂の外周部を北から東、南に馬蹄形に覆い、外側の斜面に氷舌を伸ばしていた。ところがそれらは縮小・分離し、2000年には主要な氷体は五つになってしまった。それでも最高点のウフル=ピーク (5895 m) の南側に最大の南氷原、火口をはさんで北側に北氷原がある。いずれも薄い氷原である。その中間の火口原にクレーターの氷河 (Furtwangler 氷河) がある。これは細長い階段状の形態をしておりよく目立つ (写真2)。キリマンジャロ山頂の氷河に鉛直に切り立った氷崖が多いのは氷河が昇華蒸発によって (融解せず水にならず) 消耗しているからである。

1912年に  $12.1 \text{ km}^2$  あった氷河が2003年には  $2.5 \text{ km}^2$  にまで減少した (Cullen, et al., 2006)。このままでは、キリマンジャロの氷河は2020年には消滅する。山頂の高度が高いので気温が低く氷

河が融けないとされていたが、最近では融水が見られるようになったという報告が増えた。

ところで、キリマンジャロ山頂の氷河が大きく後退したのは、地球温暖化が始まる前の1912年から1953年の間であったこと、東アフリカ赤道付近の高層の気温 (気球による観測値) はほとんど変化していないこと、一方、1880年頃から東アフリカは急速に乾燥化したことなどから、キリマンジャロの氷河の劇的な縮小は最近の地球温暖化ではなく、日射量の増加や降水量の減少など別の原因であるという考えが出されている (Kaser et al., 2004; Mote and Kaser, 2007)。Hastenrath (2008) も、東アフリカの氷河の後退は1880年代になってから始まり、それは乾燥化による東アフリカの湖の突然の水位低下と一致していることから、単純な気温上昇が原因ではないと述べている。氷河縮小は、雲量と降水量の減少による正味短波

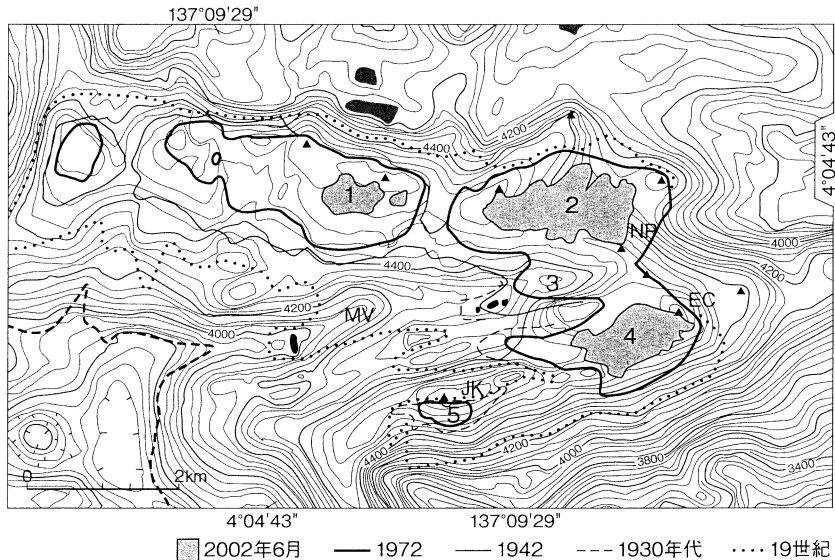


図15 19世紀から2002年までのジャヤ山塊の氷河の縮小を示す地図。1: 北壁雪原 North Wall Firn (西部), 2: 北壁雪原 (東部), 3: 消滅したメレン Meren 氷河, 4: カルステンツ Carstensenz 氷河, 5: 南壁懸垂氷河 South Wall Hanging Glacier. 黒く塗りつぶしたのは池。MV: Meren Valley, JK: Jayakesuma, NP: Ngga Pulu, EC: East Carstensenz Glacier Top。Google Map の地形図に Hope et al., 1976 の付図2, 児玉 (1997) の地図, Google Earth の3D 画像情報によって作成した。等高線間隔 40 m, 北北東が上方であることに注意。氷河範囲の情報源は本文を参照のこと。図の左下隅の巨大な凹陷地とその周辺はグラスブルグ鉱山で、銅や金銀が露天掘りされている。

長放射<sup>10)</sup>の増加によるためであり、その原因は赤道インド洋上での大気大循環の変化によるとのべている。

##### 5) ニューギニア、ジャヤ山塊の氷河

ジャヤ山塊の核心部は、北西-南東方向にのびる長さ 12 km, 幅 5-6 km の長方形をした山塊である (図15)。最高峰をもつ細長い山稜が南縁に位置し、その南面は比高 2000 m を超える急斜面になっている。この山稜の北側には、2筋の谷を隔ててかまぼこ型の、海拔高度 4300-4600 m の台地があり、その北縁は高さ 500-800 m の急崖になっている。この台地全体を北壁 (North Wall) とよぶ。山塊の東南端も北西端も急崖になっている。山塊全体が最終氷期には激しい氷河作用を受けて、中央の谷は典型的な氷食谷 (U字谷) であり、北壁台地は氷河侵食によって、岩盤組織が削りだされた凹凸に富んだ面的氷河剝地形である。基盤岩は、山脈の長軸と平行な走行の背斜・向斜構

造をもつ中新世<sup>11)</sup>の砂岩と石灰岩からなる。山塊の西南角には盆地があり、貫入した花崗岩体と接触部の変成岩からなる。そこでは高純度の銅鉛石とそれに付随する金・銀が巨大な露天掘りで採掘され、巨大な凹陷地とずり (廃石) の堆積が奇怪な地形を見せている<sup>12)</sup> (写真3)。

大縮尺の地形図がまだ公開されていないため、ジャヤ山塊の地形の細部には不明の部分が多い。1970年代はじめに作成された地形図 (1:20,000: Hope et al., 1976, 以後1976年の地図と呼ぶ) が使われているが、後述するように、最近の Google Map の地形図 (図15) とはかなり異なっている部分がある。

ジャヤ山塊の氷河は赤道直下の現存氷河のうちでも、1940年代以降の氷河縮小速度がもっとも大きい場所であろう (図17)。これまでの調査であきらかにされた氷河縮小の過程を図15に示した。図に示された氷河範囲の根拠は次のとおりである。

19世紀(100–150年前: Hastenrath, 2008では1850年としている)の氷河範囲は氷食地形の分布と氷河堆積物の証拠から得られた。小氷期の最大拡大範囲を示すものと考えられている(Hope et al., 1976)。この時期にはジャヤ山塊の高所はほとんど氷河に覆われていた。山塊の周囲の岩壁には懸垂氷河が垂れ下がり、中央部のメレン谷には3950 m付近まで谷氷河が流下していた。氷河は、ジャヤ山塊の最高峰と考えられているジャヤクスマ峰<sup>13)</sup>の南面の急崖にも拡がっていた。この山の南面岩壁の氷河は1913年のWollastonの写真によって明らかにされ、南壁懸垂氷河(South Wall Hanging Glacier)とよばれている。

1930年代後半の記録はDozyやColijn(コライン)によっておこなわれた探検による。

1942年の氷河範囲は、1942年にアメリカ空軍が撮影した鉛直+斜め空中写真(広域写真測量用写真)による。この時期には北壁を覆う北壁雪原(North Wall Firn)はまだつながっていた。

1972年の氷河範囲は1971–73年のオーストラリアの大学チームによる現地測量や観察による。北壁雪原は完全に分離した。その西側部分は、ゆるく南に傾いた台地を覆う薄い氷原状の氷河である。この調査隊はメレン(Meren)氷河とカルステンツ氷河で氷河調査をおこなった。

メレン氷河はメレン谷の源頭に位置し、1976年の地図では山塊の東端の稜線から西に流れているように描かれている。この氷河は1972年から2000年までの間に完全に消滅してしまった。メレン氷河域の地形をGoogle Mapの等高線でみると稜線は1976年の地図のそれより遙かに西寄りにありしかも低い。このことから、メレン氷河の面積は1976年の地図より小さく、涵養域の高度も低かったと考えられ、そのため消滅が早かったのであろう。

カルステンツ氷河は山塊東南端から西北方向に流下している谷氷河である。この氷河の源頭に位置するピーク(図15のEC, 1976の地図ではEast Carstenz Glacier Top)はGoogle Earth 3Dによると位置は4°05' 00.68''S, 137°11'06.92''Eで高度表示では4810 mで、ジャヤクスマ(4780 m±)より高くジャヤ山塊の最高峰の可能性がある。

2002年6月の氷河範囲はGoogle Mapの衛星画像データ(2002年6月11日のIKONOS画像)である。常に雲に覆われたジャヤ山塊は、残念ながら最近(2009年2月)のGoogle Earthでも画像はおなじみである。これはKincaid and Klein(2004), Klein and Kincaid(2006)で使われた画像と同じものである。この画像でみられる氷河(氷体)は五つである。1. 北壁雪原西側部分, 2. 北壁雪原西側部分に付随する小雪田, 3. 北壁雪原の東側部分, 4. カルステンツ氷河, 5. 南壁懸垂氷河(South Wall Hanging Glacier)だけである。

北壁雪原の東側部分は、現存する最も広い氷河である。その東南端にはNgga Pulu(ンガブルー)ピーク<sup>14)</sup>がある。これまでに発表された地図では北壁雪原の東側部分は南西方向に傾斜する氷原として図示されているが、Google Earthの3D画像によると、反対に大部分が北東向き斜面に存在する。

南壁懸垂氷河は、大きく縮小し、ジャヤクスマピーク直下の岩壁に張り付く東西約250 m, 南北(水平距離)約120 mの逆三角形の平面形をもつ小氷体になってしまった(Google Earthの画像による測定)。

このような氷河縮小のようすをまとめると(図17)、メレン氷河が1992年から2000年までの間に完全に消滅したように、20世紀の後半に氷河後退がやや加速されたように見える。縮小速度も他の赤道山地の氷河よりわずかに大きいようである。Klein and Kincaid(2006)によれば、19世紀末(1850年)から1970年代までの氷河縮小は、年間80 mの氷河平衡線の上昇に相当する。これは100年あたり0.6°Cの気温上昇に相当し、現在の縮小率が続くと50年ですべての氷河は消滅するという。

## 6) エクアドル=アンデスの氷河

エクアドル=アンデスには多くの氷河のある山がある。そのなかで、最近の氷河変動の情報(古地図や写真, スケッチの情報)がある事例としてHastenrath(2008)にとりあげられているのは図8に示した4山群, チンボラソChimborazo, アルタールEl Altar, アンティサナAntisana, コトバク

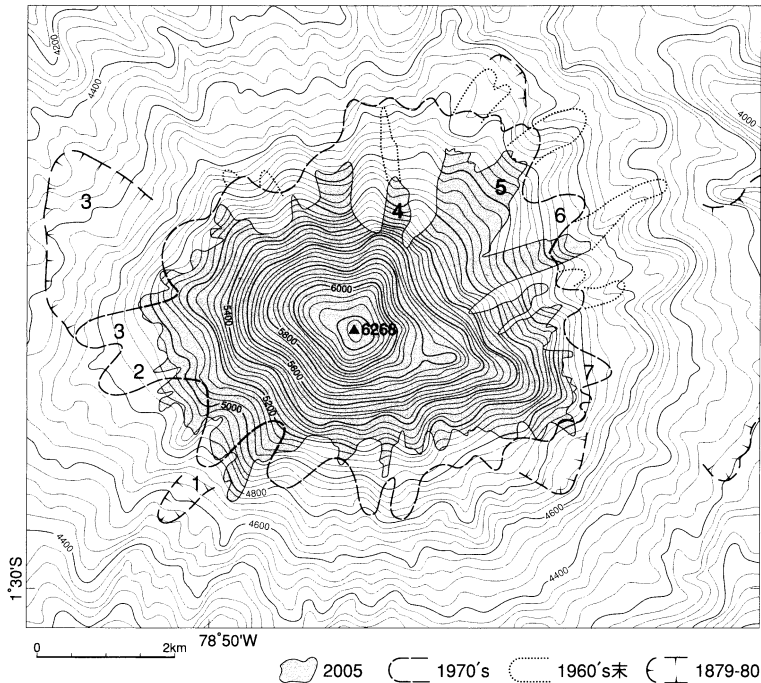


図16 19世紀末から2005年までのエクアドル＝アンデス、チンボラソの氷河・雪氷範囲を示す。1: デブリ Debris 氷河, 2: ティールマン Thielmann 氷河, 3: ステューベル Stübel 氷河, 4: スプルース Spruce 氷河, 5: Hans Mayer 氷河, 6: Reschreitar 氷河, 7: Moreno 氷河。Google Mapの地形図(等高線間隔40m)にHastenrath, 2008の図2.1.3., 図2.1.4., ウィンパー(2004)の地図, Google Earthの3D画像情報によって作成した。氷河名称については本文を参照のこと。

シ(コトパヒ) Cotopaxi だけである。ここでくわしくみることができるのはチンボラソだけであるが、アルタール、アンティサナ、コトパキシの氷河変動傾向は図17に示されている。

### チンボラソ

チンボラソ(6268 m, 旧高度は6310 m)はエクアドル＝アンデスの最高峰であるが、古くから高さの測量がおこなわれていたために、ヒマラヤの高峰が測量されるまでは世界最高峰と考えられていた。山の高さを海拔高度ではなく、地球の中心からの距離(地心距離)と考えると現在でもチンボラソは間違いなく世界最高峰である。

この火山は3万5000年前頃に噴火を始め最後の噴火は1500年前であった。他の多くの高い成層火山と同じように、頂上はドーム状の氷河(山頂氷帽)に覆われている。山体は西北西-東南東

に長軸をもつびつな円錐形で南面と南西面が急である。南面や南西面には急なアイスフォール(氷瀑)や露岩壁が見られる。チンボラソはアンデスの西山脈にあるので東山脈より降水量が少ない。山麓は乾燥しており南西山麓にはウィンパーがグレート＝アレナルと呼んだ砂の平原がある。

チンボラソの氷河変動を図16に示した。他の図と同じようにGoogle Mapの等高線図に氷河の情報をプロットした。この山には、一枚の地図上に年代の異なる氷河範囲をプロットしたものがなく、古い情報はスケッチマップの域を出ないので精度が悪いと考えられる。

2005年の雪氷域の範囲は、Google Earthの2005年9月5日のものであり、Google Mapの衛星情報にも同じものが使われていたので幾何補正されたものである。ただし、つぎに述べる1970年代の氷縁より広い部分があるので積雪域も含んでいる

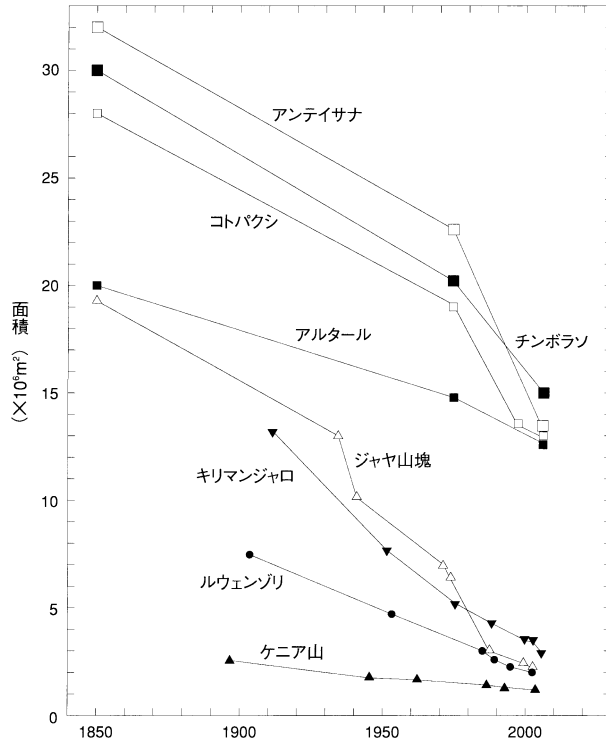


図17 19世紀半ばからの、赤道直下の各山地の氷河面積の時間的変化。Hastenrath (2008) の図1.0.1., 図2.0.1., 図3.0.1.によって作成.

のであろう。

1970年代の氷河範囲は Hastenrath (2008) の地図2.1.3.の等高線を一致させてプロットした。

1960年代末の氷河範囲は、Hastenrath (2008) の地図2.1.4.の氷河から氷河名を手がかりにはっきりしたものをプロットしたがかなり不確かである。谷を取り違えているかもしれない。それは当時の作成者自身が氷河の名前を取り違えている可能性もあるからである。しかし、この図にはモレーン、氷河表面の岩屑被覆部分、氷河上流の氷瀑が描かれているので貴重な情報である。

1879-1890年の氷河情報はウィンパー (2004) の登山記の付図④ (写真4) によって書き込んだ。基図と同じ大きさに拡大し、山頂と氷河両側の尾根の位置をあわせて氷河末端をプロットした。この結果が正しいとすると、西端のステューベル Stübel 氷河は北西方向に2 kmも拡大していた。氷河は東側にも著しく拡大しており、Moreno 氷

河は図の範囲外 (東側) の谷沿いに2 kmも流下していた。これらに比べると南面と北面の氷河はそれほど拡大していなかった。この理由は、西面と東面は緩傾斜であるのに対し、南面と北面は急傾斜だからである。つまり、緩傾斜の部分では同じ高度低下に対して平面的には大きくなるからである。現在 (2005年) のチンボラソ山をおおう氷河の全体形 (氷河末端の広がり) が円形に近いタコ足状であるのに対して、ウィンパーが訪れた頃は東西方向 (とくに東に) ひろがった長方形に近い形であった。

## VI 熱帯の氷河の行く末

これまで地図に示してきた氷河縮小の様子 (氷河面積) を時間軸に沿って整理してみた (図17)。これは Hastenrath (2008) の図1.0.1 (東アフリカ)、図2.0.1 (エクアドル=アンデス)、図3.0.1 (ニューギニア) を1枚にまとめたものである。この氷



河面積変化の経年変化のグラフは、赤道の氷河が急激に継続的に縮小していることを示している。アンティサナ、チンボラソ、コトバクシの縮小は1970年代以後加速された。ジャヤ山では1930-40年代、1970-80年代に加速している。キリマンジャロでは2000年以後加速しているように見える。氷河面積変化のグラフ(線)が面積ゼロの線と交差する時点が、氷河が消滅するその時である。同じような図はあちこちでつくられている。IPCC(2007)の同じような図4.16の変化曲線を延長すると2015-2030年ごろまでにはアフリカとニューギニアの氷河はすべて消滅することになる。図17では、氷河が消滅するまでに要する時間は、ルウェンゾリが20年、キリマンジャロが10年、ジャヤ山塊が50年、チンボラソは50-60年以上と見積もられる。しかし、おなじ熱帯の氷河でも、ペルーの中央アンデスのブランカ山脈などの氷河域は数100 km<sup>2</sup>以上の面積をもち消滅することはなさそうである。

氷河がすでに消滅してしまった高山は赤道直下には数多く存在する。ボルネオ島北端にあるキナバル山(4094 m, 北緯6°05')は現在氷河が存在する赤道高山より約1000 m低い。最終氷期には氷河におおわれていたが、すべての氷河が融け去ったので、現在は、氷河に磨かれた花崗岩の滑らかな斜面と氷河に削り残された奇怪な岩峰がそそり立つ岩山に過ぎない。ルウェンゾリやケニア山の氷河消滅後の姿を彷彿とさせる。氷河がなくなったキリマンジャロ、キボ峰は南米アタカマ高地に多数ある荒原の成層火山とおなじになる。登山者にとっては、魅力的な山になる重要な道具立てである氷河を失うのは寂しいことである。

テレビで放映されたキリマンジャロの記録映像に「熱帯の氷河はこの星の未来の姿をうつし出すのだ」というコピーがあった。地球温暖化の結果、最近心配され始めたのは、氷河の融解による海面上昇よりも、乾燥化による干害、旱魃であるといわれている。エクアドルなど、熱帯アンデスでは氷河の消滅による水資源の不足が心配されはじめた(Bradley et al., 2006)。チンボラソの氷河はチンボラソ県やボリバル県の水源になっており、2005年に起こった水不足との関係が取り沙汰さ

れているという。

熱帯高山の氷河は後世に伝えるべき貴重な遺産である。

## 謝 辞

この論文の転載を快諾して下さった写真家の水越 武さんと山と溪谷社の神長幹雄さんに厚くお礼申しあげる。アフリカの氷河の貴重な写真を提供していただいた水野一晴さん、小森次郎さんにも深く感謝いたします。

## 注

- 1) ITCZ: Inter-tropical Convergence Zone
- 2) フンボルト: Humboldt, Alexander von. 18世紀末に南アメリカをひろく旅行し、自然地理学や地球物理学、生態学の基礎になる観察・研究をおこなった。
- 3) インドネシア語では Puncak Jaya: プンチャック(峰)+ジャヤ(勝利)
- 4) Puncak Trikora(ウィルヘルミナ山4730 m)の氷体は20世紀の中頃に、Ngga Pilimsit (Idenburg 4717 m)と Puncak Mandala (Juliana 4640 m)は最近の数十年の間に消滅した(Hastenrath, 2008)。
- 5) 氷河質量収支の詳細については藤井・小野 1997; 日本雪氷学会 2005などを参照されたい。
- 6) このように言えるのは赤道熱帯では気温の年較差がないからである。温帯や寒帯の氷河では、氷河平衡線と一致するのは夏(消耗季)の終わりの雪線だけである。
- 7) ディスプレイ画面上での縮尺は1:50,000程度、等高線間隔は40 m、スペースシャトルまたは人工衛星搭載センサーによるDEM(数値高度モデル)によって作成されたもの。
- 8) テイル till: 氷河中に取り込まれ運ばれた後に氷から解放されて堆積した土砂礫。氷成堆積物。
- 9) Duca di Abruzzi (1873-1933)、北極アラスカ、カラコラムの探検・登山をおこなった。
- 10) 太陽から直接到達する日射
- 11) 中新世とは新生代後半の2400万年前から500万年前までの時代。
- 12) 米国資本によるグラスブルグ鉱山。労働者と管理者など2万人以上が住む。会社側と労働者との争議事件もたびたび起こっており、災害や事故、環境汚染など、大きな社会問題になっている。
- 13) ジャヤクスマ峰 Puncak Jayakesuma. 旧名カルステンツ峰 Carstensz Pyramid (発見者の名前に基づく)。海拔高度は5030 m, 4884 m (CGE氷河調査隊の測量1973年)、4780 m (Google Earth 3Dによる)などさまざまである。ピークの位置はGoogle Earth 3Dによると4°04' 43.24"

S, 137°09' 29.23" Eである。

- 14) ジャヤ峰, スカルノ峰とも呼ばれる。海拔高度も5030 m, 4862 m (CGEの測量1973年), 4810 mなどの値がある。Google Earth 3Dによると4650 m。1936年コラインが初登頂, 1963年京都大学も登頂。

## 文 献

- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, F., and Vergara, W. 2006. Climatic change: threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312, 1755–1756.
- Cullen, N. J., Mölg, T., Kaser, G., Hussein, K., Steffen, K., and Hardy, D. R. (2006): Kilimanjaro Glaciers: Recent areal extent from satellite data and new interpretation of observed 20 th century retreat rates. *Geophysical Research Letters*, 33, L 16502, doi:10.1029/2006 GL 027084.
- 藤井理行・小野有五 (1997): 「基礎雪氷学講座 IV 氷河」古今書院, 321 pp.
- Hastenrath, S. (1984): *The Glaciers of Equatorial East Africa*. Reidel, Dordrecht, Boston, Lancaster, 353 pp.
- Hastenrath, S. 2005. The glaciers of Mount Kenya 1899–2004. *Erdkunde*, 59: 120–125.
- Hastenrath, S. (2008): *Recession of Equatorial Glaciers: A Photo Documentation*, Wisconsin: Sundog Publishing Madison, iv+138 pp.
- Hope, G. S., Peterson, J. A., Uwe, R., and Allison, I. (eds.) (1976): *The Equatorial Glaciers of New Guinea: Results of the 1971–1973 Australian Universities' Expeditions to Irian Jaya: Survey, Glaciology, Meteorology, Biology and Palaeoenvironments*, Rotterdam, A. A. Balkema, 244+3 attached maps.
- IPCC 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press.
- Kaser, G. and Osmaston, H. (2002): *Tropical Glaciers*, Cambridge, Cambridge University Press, 207 pp.
- Kaser, G., Hardy, D. A., Mölg, T., Bradley, R. S., and Hyera, T. M. (2004): Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: observations and facts. *International Journal of Climatology*, 24: 329–339.
- Kincaid, J. L. and Klein, A. G. (2004): Retreat of the Irian Jaya Glaciers from 2000 to 2002 as Measured from IKONOS Satellite Images. 61 st EASTERN SNOW CONFERENCE, Portland, Maine, USA, 147–157.
- Klein, A. G. and Kincaid, J. L. (2006): Retreat of glaciers on Puncak Jaya, Irian Jaya, determined from 2000 and 2002 IKONOS satellite images. *Journal of Glaciology*, 52, (No. 176), 65–79.
- 児玉 茂 (1997): イリアン ジャヤ, 世界の山やま, 地理9月増刊, 123–124.
- 水野一晴 (1999): 『高山植物と「お花畑」の科学』古今書院.
- 水野一晴 (2003): ケニア山における氷河の後退と植生の遷移—とくに1997年から2002年において—. 地学雑誌, 112: 608–619.
- Mote, P. W. and Kaser, G. (2007): The shrinking glaciers of Kilimanjaro: Can global warming be blamed? *American Scientist*, 95: 318–325.
- Müller-Hohenstein, K. (1979): *Die Landschaftsgürtel der Erde*, Stuttgart: Teubner.
- 日本雪氷学会 (2005): 『雪と氷の事典』朝倉書店, 760 pp.
- シュミットヒューゼン (宮脇昭訳) 1968. 『植生地理学』朝倉書店. (Schmithüsen, J.)
- 白岩孝行 (1997): アフリカ・オセアニアの氷河. 藤井理行・小野有五編 『基礎雪氷学講座 IV 氷河』古今書院, 263–275.
- Snelson, D. (ed) (1987): *Kilimanjaro National Park*, Tanzania National Park/African Wildlife Foundation, 59 pp.
- Taylor, R. G., Mileham L., Tindimugaya C., Majugu A., Muwangi A., and Nakileza B. (2006): Recent glacial recession in the Rwenzori Mountains of East Africa due to rising air temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L 10402, doi:10.1029/2006 GL 025962.
- Troll, C. (1972): Geocology and the world-wide differentiation of high-mountain ecosystems. In: Troll, C. (ed.), *Geocology of High-Mountain Regions of Eurasia*, Erdwiss. Forsch., 4: 1–16. Franz Steiner Verlag, Wiesbaden.
- WGMS (World Glacier Monitoring Service) (1989): *World Glacial Inventory: Status 1988*, IASH/UNDP/UNESCO/World Glacier Monitoring Service, Univ. Zurich.
- ウインパー (大貫良夫訳) (2004): 『アンデス登攀記』(上), 岩波書店, 305 pp. (Whympers, E. 1892. *Travels Amongst the Great Andes of the Equator*, John Murray, London).

## 岩田：赤道高山の縮小する氷河



写真1 ケニヤ山のティンダル氷河末端の急速な後退。左から1992年8月、1997年8月、2002年8月に京都大学の水野一晴撮影。



写真2 キリマンジャロ、キボ峰の最高点ウフル=ピーク（5895 m）からみた火口原のクレーターの氷河（Furtwangler氷河）。これは細長い階段状の形態をしておりよく目立つ。2006年12月小森次郎撮影。



写真3 西南西からみたジャヤ山塊。右側の細長い山稜に最高峰ジャクスマとカルステンツ氷河があり、左側が北壁台地と北壁雪原、中央の谷は氷食谷（メレン谷）。下半はグラスブルグ鋳山の巨大な露天掘りの凹陥地とずり（廃石）の堆積。2002年6月の11日のIKONOS画像の3D鳥瞰図 Google Mapの衛星画像データによる。

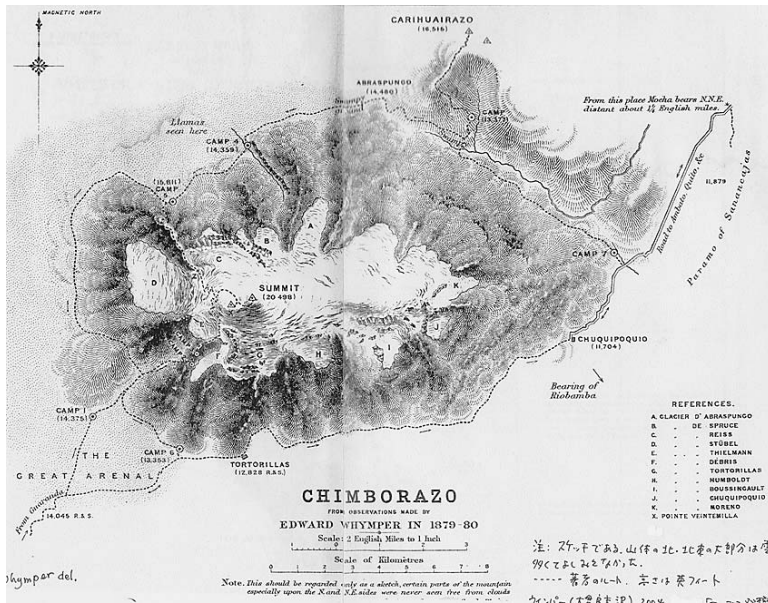


写真4 エクアドルのチンボラソ山の1879-1880年の氷河の状態。西端のステューベル Stübel 氷河は北西方向に大きく拡大し、東側の Moreno 氷河も谷沿いに2 kmも流下していた。ウィンパー（2004）の登山記の付図④。