

論文の内容の要旨

氏名：梶山 貴弘

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：カラコラム山脈における氷河の形態を考慮した近年の氷河変動と気候変動の関係に関する研究

氷河は、主に雪氷によって構成される地形で、気候とのバランスによって形成されている。氷河からの融氷水は、氷河下流域において重要な水資源であり、とくに乾燥帯・半乾燥帯においては、それら地域の社会・経済を支える天然のダム役割を担っている。気候変動に伴う氷河変動は、氷河からの融氷水量の変動を生じさせるため、氷河下流域の社会・経済に大きなインパクトを与える。そのため氷河が発達する地域、とくに乾燥帯・半乾燥帯においては、氷河変動と気候変動の関係を解明し、将来の氷河変動を予測することが求められている。

小氷期以降の氷河変動は、気温上昇により、世界的に後退傾向にある。このような氷河の後退は、1990年代以降、多くの地域でその速度が加速している。しかしながら氷河の後退は、世界一様に進行しておらず、地域差が生じている。その1つがパキスタン北部に位置するカラコラム山脈である。先行研究によると、当該山脈の氷河末端は1990年代後半以降、前進・停滞傾向にあるとされる。しかし、当該山脈における氷河の末端変動と気候変動との関係については、ほとんど未解明である。また、当該山脈は、大部分が乾燥帯・半乾燥帯に位置するため、氷河は水資源として重要な役割を持っている。そのため、カラコラム山脈の氷河の末端変動と気候変動の関係を明らかにする必要があると考えられる。

一方、氷河の末端変動は、同じ気候環境下にあっても、氷河の形態的特徴によって異なることが知られている。すなわち、気温変動に対応しやすい氷河と対応しにくい氷河があり、前者は小規模氷河や岩層に覆われていない裸氷氷河で、後者は大規模氷河や岩層に覆われる岩層被覆氷河である。このような氷河の形態的特徴に着目すると、従来のカラコラム山脈における氷河の末端変動の解析対象氷河は、ほとんどが大規模氷河や岩層被覆氷河であり、気温変動と対応しにくい氷河であった。一方、気温変動と対応しやすい小規模氷河および裸氷氷河の末端変動は、これまで明らかにされていない。そのため氷河の形態的特徴に着目すると、カラコラム山脈における氷河変動と気候変動の関係を明確化できると考えられる。

そこで本研究は、カラコラム山脈における近年の氷河の末端変動と気温変動との関係を、氷河の形態的特徴を考慮して明らかにすることを目的とする。本論文は、7章から構成される。各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、序論として、研究の背景と目的、研究方法を明確化した。すなわち研究の背景は、氷河の形態的特徴、近年の氷河の末端変動および気温変動に関する先行研究をそれぞれレビューし、それを基に研究目的を設定した。研究方法は、現地における地形調査、衛星画像の解析および気象観測データ・客観解析データの解析である。研究対象期間は、時間スケールを考慮し、長期的変動を1965-2010年の1期間、短期的変動を1965-1990年、1990-2000年、2000-2010年の3期間とした。研究対象地域は、カラコラム山脈北西部のフンザ川流域を選定した。

第2章では、研究対象地域の自然環境を概観した。フンザ川流域の地形環境は、上流域と中・下流域で異なった。すなわち上流域は、山稜高度が低く比高の小さい地域、中・下流域は山稜高度が高く比高の大きい地域であった。また氷河は、表面の岩層被覆程度から、裸氷氷河と岩層被覆氷河に2分類されることがわかった。ただし現地での観察から、裸氷氷河の一部にも、末端部が少量の岩層に覆われる氷河が存在することがわかった。一方、気候環境は5-9月の最高気温が30℃を超え、この時期に最も氷河の融解が発生していることが推察された。

第3章では、フンザ川流域における氷河の形態的特徴を明らかにした。始めに2010年前後の衛星画像・DEMを用いて氷河台帳・氷河分布図を作成し、これらをもとに氷河の形態的特徴を明らかにした。その結果、フンザ川流域には1,322氷河が発達し、その合計面積は4,275.7km²であった。裸氷氷

河と岩屑被覆氷河は、氷河面積に占める岩屑被覆面積の割合（岩屑被覆率）を基に、岩屑被覆率が10%未満の氷河を裸氷氷河、それが10%以上の氷河を岩屑被覆氷河にそれぞれ分類した。また氷河の分布は、上流域と中・下流域の2つに分類されることがわかった。すなわち、上流域には小規模で比高の小さい裸氷氷河、中・下流域には大規模で比高の大きい岩屑被覆氷河がそれぞれ多く分布した。これは、氷河の規模・発達高度・岩屑被覆程度が、流域の標高分布に制約されるためと推察された。

第4章では、近年の氷河の末端変動を明らかにした。解析対象氷河は、氷河台帳・氷河分布図を基に、氷河の位置・規模・岩屑被覆程度の異なる30氷河を、流域内で分散するように選定した。解析は、3時期（1965年・1990年前後・2000年前後）の衛星画像と第3章の氷河分布図（2010年前後）を用いて、氷河の末端の長期的変動と短期的変動を明らかにした。そして解析した氷河の末端変動は、第3章の氷河の形態的特徴を基にまとめた。その結果、フンザ川流域における長期的な氷河の末端変動は、全体的に後退する傾向を示し、氷河の形態的特徴の違いに関わらなかった。短期的な氷河の末端変動は、1990-2000年・2000-2010年において一様な変動を示さず、それら2期間の変動から3つの変動タイプに分類された。すなわちタイプ1は、1990-2000年に前進し2000-2010年に後退した氷河（前進-後退）で、これは最低点高度が低い裸氷氷河であった。タイプ2は、1990-2000年に停滞または後退し2000-2010年に前進または停滞した氷河（後退-前進、後退-停滞、停滞-停滞など）、タイプ3は、1990-2000-2010年を通して前進または後退し続けた氷河など（前進-前進、後退-後退など）であった。これらタイプは、最低点高度が高い裸氷氷河と岩屑被覆氷河であった。したがって、短期的な氷河の末端変動は、形態的特徴によって異なることが分かった。

第5章では、近年の気温変動を明らかにした。始めに等圧面別の気温とジオポテンシャル高度の客観解析データを用いて、標高2,000-8,000mにおける100m間隔の標高別の気温データを整備した。次に、気温の客観解析データと地上観測データを用いて相関分析をおこない、客観解析データの信頼性を検証した。そして、客観解析データによる1966-2010年における気温の長期的変動と短期的変動の垂直分布を明らかにした。その結果、客観解析データと地上観測データの間には非常に高い相関関係が認められ、客観解析データが現地の気温環境を表現する指標となることがわかった。また、気温変動の垂直分布は、季節によって異なることが明らかとなった。すなわち気温変動の垂直分布は、年・冬期・春期において一様に変動するが、夏期・秋期において一様に変動しない。

第6章では、氷河の形態的特徴を考慮した近年の氷河の末端変動と気温変動との関係について考察した。とくに、第3章および第5章の結果を基に、氷河の標高別面積と標高別気温を用いて、氷河の年間融解量の推定値である融解指数を求めた。その結果、融解指数変動は、長期的にみても増加傾向にあるものが16氷河、減少傾向にあるものが13氷河であった。短期的には、1991-2000年に減少傾向を示すもの30氷河、2001-2010年に増加傾向を示すもの30氷河であった。一方、1990-2000年と2000-2010年を対象に氷河の末端変動と融解指数変動との関係を考察したところ、両者の関係は、氷河の形態的特徴によって異なることがわかった。これらから、長期的な氷河の末端変動と融解指数変動の関係は、両者が対応する氷河が、気温変動の影響を受けやすい低標高帯の面積の広い氷河で、対応しない氷河が、気温変動の影響を受けにくい低標高帯の面積の狭い氷河であった。短期的な両者が対応する氷河は、気温変動の影響を受けやすい低標高帯の面積の広い裸氷氷河で、対応しない氷河が、気温変動の影響を受けにくい低標高帯の面積の狭い裸氷氷河と岩屑被覆氷河であった。

第7章では結論として、本研究の成果をまとめた。カラコラム山脈において、これまで報告されてきた1990年代後半以降の氷河の前進・停滞傾向は、岩屑被覆氷河を対象にしたものであった。しかし、本研究によると、これら氷河は気温変動に対応しない氷河に該当する。一方、本研究における気温変動に対応する氷河は、1990年代に前進し、2000年代に後退した。したがって気温変動の影響の観点から氷河変動をまとめると、カラコラム山脈の氷河の末端変動は、1990年代に前進する傾向、2000年代に後退する傾向にあると言える。

以上のことから、氷河変動と気温変動の地域性を議論する際には、気温変動に対応する氷河を選定する必要があると考えられる。とくに近年は、地球温暖化とその影響に関する話題が関心事となっている。そのため、地球温暖化の実態とその影響を正しく評価するためには、氷河の形態的特徴を考慮しなければならない。