

## 論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 藁谷哲也  
                  （副査） 教授 森島 濟                   教授 中山裕則

温室効果ガスの大量排出に伴って、近年、急速に進んだ地球規模の温暖化は、雪氷圏へ大きなインパクトを与えている。その結果生じたとされる現象のひとつは、氷河の規模縮小である。気温上昇期における山岳氷河の継続的な縮小事例が、世界各地で数多く報告されているのは、この証左であるという。これは、気温上昇と氷河の融解による規模縮小とを結びつけた論理であるが、氷河の形成・発達には、単に気温だけに左右されるものではない。それは、気温に加え降水量や風系などを含めた気候環境、氷河形成域の地形・地質条件、および氷河の雪氷学的特徴などに依存している。したがって氷河の規模の変動は、これら様々な条件や特徴などを考慮して分析しない限り、正しく理解することは難しい。

本論文の研究対象地域であるパキスタン、カラコラム山脈は、近年ようやく氷河研究の緒についた地域である。そこは国境、民族、宗派の係争地域であり、基礎的な地理学的資料の未整備などが研究を妨げてきた。しかし地球温暖化が叫ばれるなか、ヒマラヤ山脈に次ぐ約 18,000km<sup>2</sup> もの面積を有するカラコラム山脈の氷河の実態把握は、必要不可欠な課題である。とくに急速な気温上昇が認められる 20 世紀後半以降について、当該地域における氷河の挙動を明らかにすることは重要である。さらに既往の氷河変動研究は、当該地域の氷河が一様な傾向を示さず、拡大、停滞、縮小など多様な変動を示すことを報告している。そこで本研究では、はじめにカラコラム山脈のフンザ川流域を対象に、そこに発達するすべての氷河の分布と氷河台帳の整備を行い、これを基礎に氷河の末端変動、気温変動の解析を進め、当該地域におけるおよそ半世紀の氷河変動の実態を解明している。

本論文は、全 7 章で構成される。このうち本論を構成する第 3 章では、研究対象地域における氷河の形態的特徴、第 4 章では 1965 年以降における氷河末端部の変動をそれぞれ明らかにしている。そして第 5 章では、このような氷河変動にかかわる近年の気温変動を明らかにし、その結果を踏まえ第 6 章では氷河の年間融解量の指標となる融解指数を提案している。加えて第 6 章では、融解指数と氷河変動との長期的および短期的変動関係を分析し、既往研究で未解決となっていたカラコラム山脈の氷河変動の実態とその要因を解明している。

第 1 章の「序論」は、小氷期以降（19 世紀中盤以降）の氷河変動や気候変動、および氷河の形態的特徴について俯瞰し、問題の所在が明示される。加えて、選定した研究対象地域における氷河変動研究の意義と目的が述べられる。また 3 つの研究視点（氷河の形態的特徴、氷河変動、気温変動）から、本研究課題を分析するとして、柱となる研究方法が提示される。

第 2 章の「研究対象地域の自然環境」は、カラコラム山脈およびフンザ川流域の地形・地質、氷河、気候などについて概観している。そしてフンザ川流域を地体構造の影響から、山稜高度 5,000～6,000m で低起伏の上流域と、山稜高度が約 8,000m と高く大起伏の中・下流域に区分している。また、当該流域の氷河の特徴として、長大な岩屑被覆氷河と裸氷氷河とが山稜付近から寒冷・乾燥した標高 2,500m 付近まで発達することを指摘する。

第 3 章の「氷河の形態的特徴」では、フンザ川流域における現地調査、衛星画像・DEM 解析などから氷河のマッピングが進められ、氷河分布図と氷河台帳が作成される。ここで、本研究における氷河は、その末端部を最低地点とする流域内にあり、かつ末端部に連続する面積 0.1km<sup>2</sup> 以上の氷体である。氷河分布図は、2009 年および 2010 年の ALOS AVNIR-2 および Terra ASTER の衛星画像と ASTER GDEM をもとにしている。また氷河台帳は氷河名、氷河位置（緯・経度）、氷河の規模と特徴（氷河長、氷河

面積、氷河の最高・最低点高度、最大比高、平均傾斜、岩屑被覆面積、岩屑被覆率、氷河発達流域の最高点高度、涵養域・消耗域の方位)などの項目が盛り込まれた基礎資料である。これら作成された資料から、当該流域には1,322氷河が発達し、上流域に小規模で比高の小さい裸氷氷河、中・下流域に大規模で比高の大きい岩屑被覆氷河が多く分布することが明らかになった。係争地域でもある当該流域における氷河の分布や台帳の整備は、これまでほとんど進んでおらず、本章の成果は氷河研究に大きく寄与するものと評価できる。

第4章の「近年の氷河末端変動」は、多時期の衛星画像を巧みに組み合わせ、フンザ川流域から選定した30氷河の末端部の変動パターンをとらえている。解析は1965年と2010年の衛星画像を比較した45年間の長期変動と、この間を3時期(1965・1990年の25年間、1990・2000年および2000・2010年の各10年間)に分けた短期変動の両面から進めている。解析の結果、氷河末端は長期には全体的に後退傾向(平均 $-4.2\text{m/yr}$ )を示し、氷河の形態的特徴の違いに依存しないことを明らかにした。これはアジア内陸に位置するカラコラム山脈においても、1965年以降の気温上昇に伴って氷河の縮小が生じていることを推察させる。一方、短期変動は3つの変動タイプに分類されるとした。すなわち、タイプ1:1990~2000年に前進し2000~2010年に後退した氷河で、最低点高度の低い裸氷氷河、タイプ2:1990~2000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、タイプ3:1990~2010年を通して前進または後退し続けた氷河などで、最低点高度が高い裸氷氷河と岩屑被覆氷河、である。これは短期間の氷河変動が、氷河の形態的特徴に強く制約されることを示すもので、変化量の裏づけを伴う重要な指摘である。

第5章の「近年の気温変動」は、客観解析データを活用して研究対象地域における1966年以降の気温を長期的、短期的変動に分けて明らかにしている。用いたデータは、等圧面の気温を気温減率とジオポテンシャル高度から標高別の気温に換算したものである。この換算気温と現地気温との整合性は、当該流域の中心部に設置された観測システムの地上気象データをもとに検証している。これらの結果、客観解析データによる気温変動の垂直分布は、季節や標高によって異なる傾向を示すことを指摘している。したがって、氷河の末端変動と気温変動の関係を議論する際には、とくに標高別の気温変動を考慮する必要があるという。この指摘は次章の融解指数の提案につながるもので、本論文の論理を強化する基礎になっているといえる。

第6章の「近年の氷河の末端変動と気温変動の関係」では、氷河の年間融解量を推定するための新たな指数(融解指数)が定義され、氷河の末端変動の解析には形態的特徴を加味することが不可欠であると論じている。この融解指数は、月平均気温 $0^{\circ}\text{C}$ 以上のときに氷河氷が融解すると仮定して、 $0^{\circ}\text{C}$ 以上の氷河の標高別気温と標高別面積の積算から求められる。そして30氷河の融解指数がそれぞれ求められ、1966~2010年の変動が長期的変動と短期的変動に区別され分析された。ここで、融解指数の長期的変動はマン・ケンダー検定の統計量、短期的変動は1966~2010年の融解指数の平均値からの偏差をもとにそれぞれ分析された。その結果、長期的な融解指数と氷河末端部の変動傾向から、低標高帯の面積が広い氷河は、気温変動の影響を受け易いことが判明した。一方、短期的な両者の変動傾向からは、低標高帯の面積が広い裸氷氷河は気温変動に敏感であること、低標高帯の面積が狭い裸氷氷河や岩屑被覆氷河は気温変動の影響を受けにくいことがわかった。カラコラム山脈における氷河変動は、これまで岩屑被覆氷河を中心に研究が進められてきた。そしてこれら岩屑被覆氷河の変動分析から、カラコラム山脈の氷河は気温変動とは対応しない特異な変動パターンを持つと解釈された。しかし、様々な規模や形態的特徴を持つ氷河と融解指数の分析から、本研究は岩屑被覆氷河の変動と気温変動とを関連づけて議論することの危険性を明らかにしている。加えて、フンザ川流域の氷河は1990年代に前進傾向にあったが、2000年代に後退傾向に転じたことを推察している。本章のこのような成果は、カラコラム山脈のみならず他の山岳氷河に対する温暖化の影響を評価する際の価値ある指摘である。

第7章は「結論」として本論の内容が端的に述べられるとともに、氷河と気候変動に関する今後の研究課題を提示している。

上述してきたように、本研究の主要な成果は氷河の特徴が明らかでなかったカラコラム山脈、フンザ川流域の氷河分布図と氷河台帳を整備し、1965~2010年における氷河の末端変動を解明した点にある。これに気温変動を重ねることによって、当該地域の氷河が長期的には後退傾向にあるものの、氷

河の変動パターンは氷河に占める消耗域面積と岩屑被覆率によって異なることを明らかにした。この新知見は、今後氷河変動と気候変動の関係を分析する際の重要な視点を提示したと考えられる。このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、またはその他の高度な専門的業務に従事するために必要な能力およびその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成27年 2月19日