

学 位 論 文 題 名

GLACIAL FLUCTUATIONS AND CRYOGENIC ENVIRONMENTS
IN THE LANGTANG VALLEY, NEPAL HIMALAYA

（ネパール・ヒマラヤ，ランタン谷における
氷河変動と雪氷環境）

学位論文内容の要旨

ヒマラヤ山脈における最終氷期以降の古気候の変遷については、これまでいくつか研究が行われてきたが、古気候の指標とした地質学的証拠と、気象条件との間にある関係の詳しい検討がなされなかったため、定性的な議論に留まっていた。近年、ヒマラヤやチベット高原の雪氷圏の空間的変動が半球規模の気候に多大な影響を及ぼすことが確認され、この地域の過去の雪氷圏の広がりとこれをもたらした古気候条件を知ることは、過去の地球の気候を知るうえで極めて重要な課題となっている。

本論文は、ヒマラヤ山脈に発達する氷河の変動に着目して、この地域の最終氷期以降の古気候を復元することを試みたものである。本論文は以下の7章から構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章は、研究地域のヒマラヤ山脈及びランタン谷の概観を行ない、気候と地形条件の特徴を記述している。研究地域の気候は、夏のモンスーンによる降水と、冬期の西方擾乱による降水によって特徴づけられる。また地形的には、最高点が7000mを越える大起伏の山岳環境からなる。

第3章は、現在、ランタン谷に発達している氷河と、それを涵養・維持している気象環境について述べている。氷河については、第1にその分布を正確に把握するため、航空機による空中写真撮影を行い、流域内の氷河台帳を作製した。この台帳に基づき、ひとつの氷河を選び、数年間にわたって末端の変動を測定し、現在の氷河がやや後退傾向にあることを明らかにした。気候環境としては、流域内で3つの氷河を選び、それぞれの末端に気象観測点を設け、3年にわたって気象観測を実施した。その結果、ランタン谷の上流域については夏に乾燥傾向が顕著で、これを反映して氷河の分布高度が上流ほど高くなっていることを確認した。

氷河の涵養は、氷河上の春季の積雪によって調べた。この結果、1年間の堆積層が、モンスーン期と非モンスーン期の積雪層からなることを積雪構造の特徴から明らかにすることができた。これを利用し、氷河の涵養域でボーリングを行い、過去9年間の涵養量にみられる季節性の変動を調べたところ、平均して夏のモンスーン期の貢献が70%、冬期の西方擾乱によるものが30%を占めていることがわかった。

第4章では、現在の氷河の縁辺に広がる周氷河帯の環境を、永久凍土、周氷河地形、凍結破碎作用に着目して明らかにした。現在の氷河の前縁には、気温条件からみれば、十分、永久凍土の存在を期待できるが、地温観測の結果からは、永久凍土の存在が否定された。このことから、第3章で明らかにした冬期積雪の恒常的な存在が裏付けられ、それによって冬期に地面の冷却が妨げられていることが明らかになった。周氷河地形の発達が高山地域に比較して悪いことも、ランタン谷で氷河の平衡線が低く、かつ冬期に積雪があることによって説明される。いっぽう、凍結破碎作用を引き起こす岩盤表面温度の凍結融解サイクルは、世界でもまれなほど活発で、これが岩屑生産を促し、ヒマラヤの岩屑被覆タイプの氷河を作り出す原因となっていると推測した。

第5章では、ランタン谷における後期更新世の氷河の変動過程を、地形学的な手法により明らかにした。従来、ヒマラヤの氷河変動については、多くの研究が行なわれたが、時代についての情報が著しく不足していた。今回は、これを補うため、岩石の風化の程度に着目した相対年代法と、有機質炭素の同位体年代法を用いて氷河の前進期を調べた。その結果、ランタン谷には後期更新世に5回の氷河前進期があったことが明らかとなった。ラマ・ステージ（時代不詳）は、氷河の最大拡大期で、氷河の末端は標高2600m付近まで流下した。ゴラタベラ・ステージは、最終氷期の最大拡大期と考えられ、氷河の末端は標高3200m付近にあった。ランタン・ステージは、3650年前から2850年前におこった完新世最大の氷河の前進期であり、本流の氷河末端は3900m付近に存在した。リルン・ステージは、複数の変動を含む2980年から550年前に生じた氷河前進期である。氷河の末端は、標高4200m付近にあった。最も新しい前進期はヤラ・ステージであり、世界各地で認められる数百年前の小氷期の前進期である。この時期、本流の氷河の末端は、4480m付近に達し、これ以降、氷河は縮小して、現在の末端は約4800m付近にある。

第6章では、ランタン谷の古気候復元のため、氷河の質量収支平衡モデルを用いて、第5章で明らかとなった過去の氷河拡大範囲を再現する気候状態を検討した。氷河の質量収支平衡は、以下の式で表される。

$$\int_{h_e}^{h_o} S(h) \{B_s(h) + B_w(h)\} dh + \int_{h_t}^{h_e} S(h) \{B_s(h) + B_w(h)\} dh = 0$$

ここで、 h_e : 氷河の平衡線高度(m), h_o : 氷河の上端高度(m), h_t : 氷河の末端高度(m), $S(h)$: 氷河の面積 ($\text{km}^2 \cdot \text{m}^{-1}$), $B_s(h)$: 夏の涵養量 (mm), $B_w(h)$: 夏の涵養量 (m)。

$B_s(h)$ の算出にあたっては、Ageta (1983) による、夏の涵養量と消費量を夏の気温 (T_s) と降水 (P_s) で表す経験式を適用した。一方、気候値との経験的な関係がまだわかっていない $B_w(h)$ については、現在の季節積雪と高度との関係を利用して、任意の高度の B_w を与えてやることにより、過去の B_w の高度変化をモデルに組み入れた。 $S(h)$ は地形図上で算出した地表面面積を用いた。以上のことから、このモデルにより、氷河の末端高度を、 T_s , P_s , B_w の3つの変数によって決めることができる。

最初に、このモデルが現在のランタン谷の氷河の平衡線と末端を再現できるか評価した。二つの氷河について、それぞれの地点で得られた気象データを入力して計算したところ、再現された平衡線高度と氷河末端高度は現実の氷河の値と良い一致をみた。そこで、ゴラタベラ・ステージとランタン・ステージの氷河の末端高度が、どのような気候値の組み合わせで再現できるか計算した。この結果、いくつかの解が求められ、既存の地質学的な古気候情報を参照して解の妥当性を検討したところ、最終氷期のゴラタベラ・ステージには、約6度Cの温度低下、夏の降水量は現在の半分、冬の収支は倍増、また、完新世最大のランタン・ステージには、約4度Cの温度低下、夏の降水量変化なし、冬の収支はやや増という古気候が推定された。

第7章は結論である。本研究の結果は、現在、主としてモンスーン性降水で涵養されているヒマラヤの氷河が、モンスーン性降水が減少した氷期に、いかにして拡大できたかというジレンマを、冬期の収支が増えることによって再現できることを初めて定量的に示したものと見える。また、相対年代法や同位体年代法により完新世にもこれまで考えられていた以上の大規模な氷河前進があったことを明らかにし、またその前進をもたらした気候条件を推定することができた。氷期、完新世のいずれの時代においても、本研究地域の氷河前進には冬期収支の増大が大きく関わっていることが明らかになった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 野 有 五
副 査 教 授 菊 地 勝 弘
副 査 教 授 秋 田 谷 英 次
副 査 教 授 福 田 正 己

本論文はヒマラヤ山脈ランタン谷における最終氷期以降の古環境の変遷を氷河変動に基づいて定量的に復元することを目的としたものである。このため、現在の氷河分布、氷河の質量収支と気候との関係、氷河周辺の永久凍土および周氷河環境、過去の氷河の拡大範囲とその年代などについて、3年間にわたる現地での観測や調査によって明らかにし、それらのデータに基づいて過去の気候（とくに気温と降水量）を復元するためのシミュレーションを行なった。論文は七章から構成されている。

第一章は序論であり、本研究の目的と従来の研究について述べている。第二章ではヒマラヤ山脈全体の気候と地形を概観し、調査地域であるランタン谷の氷河・気候・地形について記述している。

第三章以下が本論にあたる。まず第三章ではランタン谷の氷河分布について、航空機や衛星写真を用いた氷河インヴェントリーの結果をまとめ、この地域における氷河の正確な分布を明らかにした。次に谷の上流部に一ヶ所、中流部の北向斜面と南向斜面にそれぞれ一ヶ所設けられた気象観測点で得られた3年間の気象データから、ランタン谷の気象条件と氷河分析、とくに平衡線高度との関係を論じ、谷の上流部ほど夏期に乾燥傾向にあること、これにともなって、平衡線高度が谷の中流部から上流部に向い急上昇することを明らかにした。

さらに中流部にあるヤラ氷河の涵養域において、表面積雪層のコア解析を行ない、積雪コア中に顕著なシモザラメ層や特徴的な汚れ層が発達することを認め、3年間の現地観測の結果から、前者が冬期の積雪層に相当すること初めて実証した。この発見に基づき、数年間にわたるヤラ氷河への降雪による涵養量を、夏期収支と冬期収支に分離して議論することが初めて可能になり、それに基づく推定では、冬期収支の涵養量が平均すると前涵養量の30%にも達することが明らかになった。

第四章では氷河周辺の雪氷環境として最も重要な永久凍土と周氷河地形、および凍結融解による岩屑生産について論じている。気温・地温の観測結果から、ランタン谷では永久凍土の発達か

十分に期待されるものの、現地での測定では永久凍土は確認されなかった。これは、冬期の積雪層が地下表層部の凍結を妨げているためであると考えられることから、この結果により、第三章で述べた冬期の積雪が無視できないものであることを裏付けることができた。

第五章では、地形学的手法に基づいて、ランタン谷における最終氷期以降の氷河変動について、その拡大範囲と年代の推定を行なった。とくに、従来この地域では試みられていなかった相対年代法を初めて適用し、モレーン、アウトウォッシュ堆積物などの形成年代などを求め、 ^{14}C 年代と比較を行なったところ、これまでの研究とは異なり、完新世の約3000年前に大規模な氷河前進期があったことが推定された。また、最終氷期以降、5回の前進期の存在が確かめられた。

第六章では以上の結果をもとに、夏の収支と冬の収支を考慮した氷河質量収支平衡モデルを構築し、第五章で明らかにした氷河前進期のうち、最終氷期のゴラタベラ期、完新世のランタン期について、氷河の拡大・前進をもたらした気候条件のシミュレーションを行なった。モデルでは年平均気温と夏期、冬期それぞれの降水量の組合せで気候条件が設定されるため、第四紀学的な資料から得られているヒマラヤ・チベット地域の年平均気温の低下量を与えて、夏期・冬期の降水量の変化について推定を行なった。この結果、最終氷期の気候は、約 6°C の年平均気温の低下があったと仮定すると、夏の降水量は現在に比べて半減し、冬の収支は倍増するという気候条件が推定され、完新世の約3000年前には、年平均気温の低下が 4°C であったと仮定すると、夏期降水量は現在とほぼ同じ、冬の収支はやや増加という結論が得られた。

本論文はネパール・ヒマラヤの氷河と雪氷環境に関する多くの新知見を含むのみならず、従来なされていなかった過去の気候条件の復元を、氷河の質量収支平衡モデルによって試みた点でも高く評価される。とくにヒマラヤにおいて冬期の西方擾乱による降雪の涵養が平均30%にもものぼることを明らかにしたことは画期的であり、今後の研究に多くの示唆を与えたものといえる。よって審査員一同は申請者が博士（環境科学）の学位を受けるにふさわしいものと判断した。