

京都大学	博士 (工学)	氏名	SADYROV SANJAR
論文題目	Integrated Hydrological Modeling in Glaciated Mountain Basins : A Case Study in the Tien-Shan Mountains of Kyrgyzstan (氷河山地流域における統合水文モデリング : キルギスの天山山脈における事例研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、キルギスタンの天山山脈奥地の氷河流域を対象として、地表面、氷河のエネルギー・物質収支、河道追跡の統合モデルを利用することにより、様々な流出源からの寄与を定量化し、氷河融解量推定における放射データの影響を調べるとともに、気候変動影響を評価したものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景、研究目的、本研究の意義、科学的問いなどをまとめている。山岳地帯における気候変動の最も大きな影響のひとつは、氷河や永久凍土の融解であり、中央アジアの氷河は過去100年の間に約3分の1減少した。乾燥気候でしかも夏季に降水量が少ない中央アジアにおいて、雪氷融解水は全体的な水収支において重要な役割を果たしており、氷河の減少は、水の利用可能性と安定性に重大な影響を及ぼす。気温の上昇によって融雪の時期が早まり、春の河川流量がピークに達する一方、灌漑期には流量が減少している。流量の季節性とピーク時の水利用可能量の変化は、深刻な社会経済的影響を及ぼす。本研究の目的は、気候変動が山岳地域の水資源に与える影響を理解し、水資源管理と気候変動リスク評価のために、氷河地域における流出源を評価する効果的な枠組みを開発することである。本研究は、氷河流域における水文学的ダイナミクスと流出への影響要因に関する洞察を提供し、水資源管理や気候変動リスク評価に貢献できる。</p> <p>第2章は文献調査であり、気候変動が山岳地域に及ぼす影響、水資源管理と気候変動リスク評価、流出源を特定するための水文モデル、熱収支による氷河融解量推定、物理的水文モデルの課題などに関する過去の研究をレビューしている。</p> <p>第3章は対象地域、使用したデータ、使用したモデル、日射データのダウンスケーリング手法などをまとめている。研究対象はキルギス共和国の東部に位置するイシク・クル湖流域、ナリン川流域であり、両流域の源流域に位置する Kara-Batkak 氷河と Bordu 氷河における現地観測データを入力気象データや積雪融雪過程、氷河融解過程の検証に用いる。既存の研究では、氷河水文学的研究に温度指数モデルが主に用いられており、熱収支が用いられているのはごく一部である。温度指数モデルでは、気温などの最小限の入力データしか必要としないため、実用的で利用しやすいが、これらのモデルは高山地帯で発生する複雑な物理的プロセスを十分に捉えていない。本研究では、質量保存やエネルギー保存などの基本的な物理原則に基づく氷河モデル (GLIMB) と統合された最先端の地表面モデル (陸面過程には SiBUC、河道追跡には RRI) を利用する。このアプローチにより、よりロバストかつ正確に表現することができ、基礎となる物理過程のより深い理解と、将来シナリオの予測精度の向上につながる。本研究では、気象観測の乏しい高山域における気象条件を正確に表現するために、現地観測データを用いて検証されたグリッド化された再解析気象強制力データを組み込んでいる。特に日射量について、斜面勾配、斜面方位、周囲の地形による陰影、雲量などの要素を考慮した地形ダウンスケーリングをしている。この包括的な分析により、氷雪融解プロセスに対するこれらの要因の影響を評価することを可能にしている。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	SADYROV SANJAR
<p>第4章は本研究で得られた結果と考察である。Kara-Batkak 氷河の観測データを比較すると、特に夏季に雲の影響が大きいことが示された。雲の影響をより正確に考慮することで放射量の推定値が改善した。さらに、Kara-Batkak 氷河と Bordu 氷河で観察された違いから、氷河上の放射分布を解析する際に、雲の特性と地形的要因を考慮することの重要性が示された。研究対象の流域は、氷河面積割合が異なり、降水分布も異なる。Kichi-Kyzyl-Suu 流域では5月から6月にかけて Chon-Kyzyl-Suu 流域と Juuku 流域では、主に氷河流出の影響により7月から8月に最大流出量を記録するが、モデルではこれらの特徴をよく再現しており、Nash 係数はそれぞれ 0.643、0.785、0.806 を示した。日射量の補正をしない場合は氷河融解量を約 30% 過大評価しており、日射量に地形ダウンスケーリングの効果と雲量補正の効果を取り込むことで、RMSE は 0.73m から 0.23m に、MAE は 0.69m から 0.17m になるなど、累積の氷河質量収支の計算結果が大幅に改善することが示された。この解析結果は、氷河質量収支計算において、適切に補正された気象データを使用することの重要性を示すものである。Bordu 氷河で観測された 2019 年の積雪水量の最大値は 177 mm であったのに対し、計算結果では 175mm であり、最大値を記録する日に 11 日の差が見られたが概ね良好に再現できていた。3つの流域について、流出の各成分（融雪水、融氷水、降雨流出）の寄与率が標高帯別に可視化された。標高が高くなるにつれて、流域の流出量に占める降雨流出の割合が減少し、融雪水の割合が増加する。氷河帯の始まりから融氷水の寄与が大きくなるが、さらに標高が上がると気温低下であまり氷が融けなくなるため、融氷水の寄与率が下がる。氷河面積が流域の約 11.4% を占める Chon-Kyzyl-Suu 流域では、融氷水は7月と8月に約 50%、年間では約 23% を占めている。氷河面積が流域の約 8.3% である Juuku 流域では、融氷水は7月と8月に約 54%、年間では約 27% を占めている。氷河面積が流域の約 1.8% しかない Kichi-Kyzyl-Suu 流域では、融氷水は7月と8月の流出水の約 25%、年間では約 8% を占めている。各流域における氷河の流出への寄与は、氷河面積割合だけではなく、降水パターン（雨雪割合）にも影響されることが示されている。降水量のみの SPI 値と氷河流出量の寄与を考慮した SPI 値を比較することで、年間降水量と氷河流出量の関係を明確にした。氷河の少ない Kichi-Kyzyl-Suu 流域では、降水量の SPI と総流出量の SPI との間のゾーンは狭く、降水量が平均以下であった7年のうち5年で氷河融解水による緩和効果が不足しており、総流出量の SPI はマイナスとなった。気象研究所が提供する中央アジアの 5km 解像度の気候モデル出力を用いてナリン川流域における気候変動影響を評価した結果、将来気候において特に4月から6月の積雪量が大幅に減少し、氷河融解量が大幅に増加することが示された。流出の各成分の標高帯別の寄与率も大きく変化し、高標高帯での融氷水の割合が大幅に増加する。</p> <p>第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、キルギスタンの天山山脈奥地の氷河流域を対象として、地表面、氷河のエネルギー・物質収支、河道追跡の統合モデルを利用することにより、様々な流出源からの寄与を定量化し、氷河融解量推定における放射データの影響を調べるとともに、気候変動影響を評価したものであり、以下の研究成果を得ている。

(1) 研究対象の流域は、氷河面積割合が異なり、降水分布も異なる。Kichi-Kyzyl-Suu 流域では 5 月から 6 月にかけて Chon-Kyzyl-Suu 流域と Juuku 流域では、主に氷河流出の影響により 7 月から 8 月に最大流出量を記録するが、モデルではこれらの特徴をよく再現しており、Nash 係数はそれぞれ 0.643、0.785、0.806 を示した。

(2) 氷河融解の寄与は 7 月と 8 月にピークを迎え、最大 54% に達する流域もあることが明らかになった。流出量全体に対する氷河融解水の寄与を決定する上で氷河の被覆率が重要であることが浮き彫りになった。一方、降雨流出と融雪流出は、その地域の気候条件と流域の地形に関連する様々な要因に影響されることが示された。融雪成分の平均値に影響を与えた重要な要因の 1 つは、降水量の雨と雪の割合であり、山岳地域における水資源の正確な推定と水文学的モデリングに不可欠である。

(3) 日射量の補正をしない場合は氷河融解量を約 30% 過大評価しており、日射量に地形ダウンスケーリングの効果と雲量補正の効果を取り込むことで、RMSE は 0.73m から 0.23m に、MAE は 0.69m から 0.17m になるなど、累積の氷河質量収支の計算結果が大幅に改善することが示された。この解析結果は、氷河質量収支計算において、適切に補正された気象データを使用することの重要性を示すものである。

(4) 雲は地表に到達する日射量に影響を与え、それが氷雪の融解過程に影響を与える。雲の透過率を考慮した、再解析データに基づく簡単なパラメータ化を採用し、雪氷融解モデリングの精度を向上させるのに効果的であることが示された。

(5) 気象研究所が提供する中央アジアの 5km 解像度の気候モデル出力を用いてナリン川流域における気候変動影響を評価した結果、将来気候において特に 4 月から 6 月の積雪量が大幅に減少し、氷河融解量が大幅に増加することが示された。流出の各成分の標高帯別の寄与率も大きく変化し、高標高帯での融氷水の割合が大幅に増加する。

既存の氷河水文学的研究では温度指数モデルが主に用いられているのに対し、本論文では、質量保存やエネルギー保存などの基本的な物理原則に基づく氷河モデルと統合された最先端の地表面モデルを利用するとともに、斜面方位、天空率、周囲の地形による陰影、雲量などの要素を考慮した再解析データの地形ダウンスケーリングを組み込んだ包括的な分析により、氷雪融解プロセスに対するこれらの要因の影響を評価している。

以上のように、本論文は、氷河流域における水文学的ダイナミクスと、流出量に影響を与える様々な要因の役割に関する洞察をしたもので、データの乏しい高山地域における水資源管理に対して、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 2 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。