

学 位 論 文 題 名

Influence of climate change to hydrological cycle in arctic tundra using new land surface model

（北極ツンドラにおける陸域水循環のモデリングと気候変化の影響評価）

学位論文内容の要旨

北極地方では地球温暖化による気温上昇が顕著にあらわれると言われているが、それに伴い降水量などの気象条件も変化することが予想される。気候変化は陸域の熱的状态（雪温、地温、活動層の厚さなど）のほか、水循環パラメータ（積雪、土壌水分、蒸発、河川流出など）を変化させ、大気へのフィードバックや水資源に影響を与える。したがって、陸域の水循環が気候変動に対してどのように応答するか理解することはきわめて重要である。気候変化が水循環に与える影響に関しては、これまで陸面モデルや水文モデルを用いた感度実験が行われてきたが、主に水循環が活発になる夏期の気候変化に対して行われてきた。北極のツンドラ地方では降雪期間は年間の3分の2を占め、また冬期の気候変化は夏期より大きいと言われている。このような冬期の気象条件の変化が陸面過程に変化を及ぼし、その結果夏期の水循環過程にも影響を及ぼすことが考えられる。しかしながら、これまでは水循環過程を通年で計算するモデルが開発されておらず、冬期の気候変化が夏期の水循環に与える影響評価はほとんど行われてこなかった。そこで本研究では、冬期の影響も含めて気候変化が陸域の水循環に与える影響を明らかにすることを目的として、最初に冬期の積雪の堆積過程をモデル化し、積雪分布の変化を計算するとともに冬期水収支を評価した。続いてその結果をもとに通年の水循環及び熱的状态を再現する陸面モデルを開発した。さらに、そのモデルを用いて感度実験を行い、気候変化が陸域の水循環に与える影響に着目して考察を行った。

観測はシベリアツンドラの Tiksi(71° 40N, 128° 50E)で行い、そのデータをもとにモデルを構築した。ツンドラ地域では、植生が低く、強風にさらされるため、平地や山岳の積雪は削剥され窪地に堆積するため、積雪が不均一に分布する。積雪の堆積過程を気象データ及び地形データを入力としてモデルを用いて計算し、ヘリコプターから撮影した画像及び積雪地上観測の結果と比較したところ、積雪分布が良い精度で再現できることが明らかになった。計算を行った結果、風の強い冬期の前半には狭い範囲に深い吹き溜まりが、一方風の弱い冬期の後半は広範囲に浅い吹き溜まりが形成された。降雪の40%は地吹雪によって昇華蒸発し、また流域が地吹雪の sink となり、流域内の積雪水量が流域外に比べ多くなったことから、地吹雪過程が水収支に大きな影響を与えることが明らかになった。

冬期に堆積した積雪は、夏期に融解し、土壌や河川に融雪水を供給する。土壌に供給された液

体水は、蒸発によって大気に放出されるか、河川に流出していく。これらの過程は地温、融解深などの熱的条件にも大きく関係する。このような陸面過程を再現するため、分布型の水文モデル及び熱輸送モデルを構築し、これらを積雪分布モデルと組み合わせることで、陸面における通年の水循環過程を再現することを可能にした。このモデルによって、気象データ及び地形データから、通年の積雪深、雪温、地温、融解深、土壌水分及び大気-陸面間の熱フラックスの分布、ならびに河川流出量を見積もることが可能になった。また、モデルの計算結果は地温、土壌水分、積雪分布、河川流量の観測結果と良く一致し、Tiksi における水循環過程を再現できることが確認された。

続いて、上記のモデルを用いて感度実験を行った。まず、気象条件の変化が水循環過程に与える影響を検討するため、気温、降水量及び風速を変化させて各水循環パラメータの応答を調べた。その結果、積雪は降水量に、蒸発量は融雪期には気温、その他の期間は風速に、地温及び融解深は気温に、土壌水分は降水量に最も敏感に反応して変化することが示された。気温の上昇によって融雪が早まり、蒸発量及び融解深は増加した。また、融雪による河川流出のピークは早くなった。これらの結果は過去に行われてきた感度実験の結果と一致する。

本研究ではさらに、冬期の気候変化が夏期の水循環過程に与える影響について検討を行うため、冬期間だけ気象条件を変化、夏期の水循環パラメータがどのような影響を受けるかについて考察を行った。その結果、冬期の気温上昇が夏期の活動層の厚さに与える影響は小さかったものの、冬期の降水量及び風速の変化は積雪の分布や量を変化させ、夏期の土壌水分及び河川流出量に影響を与えることが明らかになった。冬期の風速変化が夏期の水循環に与える影響についてはこれまで未知であったが、本研究によって、冬期の風速増加が地吹雪量と吹き溜まり量の増加をもたらし、夏期に長期間雪が融け残ること、また夏期の前半における河川流量は減少する一方で、後半は増加するという新しい知見が得られた。

気温の上昇は融雪を早め、蒸発量を増加させるため、将来の地球温暖化によってツンドラが乾燥する可能性が考えられる。本研究では、その可能性について検討するため、GCM で予測されている 2071~99 年の平均の気象データを入力データとして用いた予測実験を行った。その結果、各水循環パラメーターにおいて、気温の上昇及び降水量の増加による影響があらわれ、特に気温の上昇による影響が目立った。また気温の上昇によって融雪が早まり、蒸発量も増加することで土壌水分を減少させる作用が働いたものの、降水量の増加による土壌への水分供給量の増加がそれを補い、夏期の土壌水分が減少した傾向は見られなかった。このように将来の地球温暖化によっても夏期の土壌水分は必ずしも減少しないことが示唆された。

本研究によって、ツンドラの陸域水循環を通年で計算する分布型のモデルが初めて開発され、そのモデルを用いることで冬期の気象条件の変化が夏期の水循環に与える影響が明らかになった。このように気候変化に対するツンドラの陸域水循環を検討する際には通年のモデルが有効であることが示された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 畑 哲 夫

副 査 教 授 福 田 正 己

副 査 助 教 授 石 川 信 敬

副 査 助 教 授 山 田 知 充

副 査 教 授 太 田 岳 史 (名古屋大学生命農学研究科)

学 位 論 文 題 名

Influence of climate change to hydrological cycle in arctic tundra using new land surface model

(北極ツンドラにおける陸域水循環のモデリングと気候変化の影響評価)

地球上には、さまざまな気候帯があり、各地域の陸域は地表面状態・地形などが異なり、いわゆる地球温暖化では異なる応答を示すことが推測されとともに、また大気へのフィードバックも地域によって異なる。地球気候全体の変化の方向を理解するためには地球上各地の役割、特に水・エネルギー循環に着目し理解する必要がある。本研究で対象とした北極地方では地球温暖化による気温上昇が顕著にあらわれると言われており、そこでの気候変化は雪氷が介在する水循環特性を変化させ、アルベド変化・土壌水分変化を通じて大気への大きなフィードバックを引き起こすことや人間活動に関連した水資源に多大な影響を与えることが考えられる。したがって、この地域の陸域の水循環が気候変動に対してどのように応答するかを理解することはきわめて重要である。気候変化が水循環に与える影響に関するモデルを用いた感度実験は、これらを解明するためには重要であり、これまで主に夏期を対象とし夏期の気候変化に対してのみ行われてきた。これは、水循環過程を通年で計算するモデルが開発されていなかったためであり、じゅうようとかんがえられていたにも関わらず冬期の変化が夏期の水循環に与える影響評価はほとんど行われてこなかった。

そこで本研究では、まず通年の水循環及び熱的状态を再現する陸面モデルを開発し、そのモデルを用いて感度実験を行い、特に冬期の気候変化が夏期の水循環に与える影響に着目して考察を行った。

観測対象地域としては東シベリアのツンドラ帯に位置するティクシ(71° 40N, 128° 50E)を選択し、そこで取得したデータをもとにモデルを構築した。ツンドラ地域では、植生が低く、強風にさらされるため、地吹雪が頻繁に発生し、積雪が不均一に分布する。積雪の堆積過程をモデルにより計算し、観測結果と比較したところ、積

雪分布が良く再現できることが明らかになった。風の強い冬期の前半には狭い範囲に深い吹き溜まりが、一方風の弱い冬期の後半は広範囲に浅い吹き溜まりが形成された。降雪の40%は地吹雪によって昇華蒸発した。また流域が地吹雪の sink となり、流域内の積雪水量が流域外に比べ多くなったことから、地吹雪過程が水収支に大きな影響を与えることが明らかになった。

積雪分布を推定するモデルに、熱輸送モデル及び水文モデルを組み合わせることで、陸面における通年の水循環過程を再現することを可能にした。このモデルによって、気象データ及び地形データから、通年の積雪、雪温、地温、融解深、土壌水分及び大気との熱フラックスの分布、ならびに河川流出量を見積もることが可能になった。また、モデルの計算結果は地温、土壌水分、積雪分布、河川流量の観測結果と良く一致し、ティクシにおける水循環過程を高い精度で再現できることが確認された。

上記のモデルを用いて感度実験を行い、冬期の気候変化が夏期の水循環過程に与える影響について検討を行った。その結果、冬期の気温上昇が活動層の厚さなどに与える影響は小さかったものの、冬期の降水量及び風速の変化は積雪の分布や量を変化させ、夏期の土壌水分及び河川流出量に影響を与えることが明らかになった。冬期の風速変化が夏期の水循環に与える影響についてはこれまで未知であったが、本研究によって、冬期の風速増加が地吹雪量と吹き溜まり量の増加をもたらし、夏期に長期間雪が融け残ること、また夏期の前半における河川流量は減少する一方で、後半は増加するという新しい知見が得られた。

審査員一同、は、これらの成果を高く評価し、また研究者として熱心かつ真摯であり、大学院課程における研鑽は取得単位なども併せ、申請者が博士（地球環境科学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した。