

## 学 位 論 文 題 名

地球温暖化時における  
国内の降積雪の変化予測と河川流量への影響評価

## 学位論文内容の要旨

地球温暖化に伴う環境の変化を予測し、その対策を考えることが様々な分野で重要な課題になっている。特に農林業の分野では、降積雪とそれに伴う河川流量の変化の予測が農林生態系の管理や水資源対策の観点から重要視されている。

温暖化に伴う気候変化については、大気中の  $\text{CO}_2$  濃度を上昇させる数値実験が行われている。この方法は空間分解能が限られているため、日本国内では粗い予測値しかなく詳細な面的評価はまだなされていない。一方、温暖化に伴う水文現象については、現在の気候データから作られた水文モデルに、単純に気温と降水量の増減を与えた計算が行われている。しかしこの方法では温暖化時の気候はモデルの外挿となり、実際の降積雪の変化は単純ではないなど問題点が多い。

そこで本研究は、温暖化時における国内の降積雪変化をより精度よく予測することを目的に、気候変化が内挿となる降積雪の推定モデルを新たに開発した。そして、そのモデルに、メッシュ形式の気候予測値を入力して、降積雪分布の変化と河川流量の予測を行った。研究結果の概要は以下のとおりである。

## 1. 降積雪推定モデルの開発

国内における現在の降積雪状況を推定する降積雪推定モデルを開発した。本モデルは、月降雪深モデル、最深積雪モデル、および積雪の堆積環境モデルの3つからなる。月降雪深は1ヶ月間に降った雪の深さ（単位は cm）の積算であり、最深積雪は1寒候期のうちの観測された積雪深の最大値である。また堆積環境は乾き雪、湿り雪など積雪の堆積状態を示す指標である。本モデルに現在のメッシュデータを入力することで、広域的な推定が可能になる。またこのモデルを全国に適用することで温暖化時の気候変化が内挿となる。

月降雪深モデルでは、まず月平均気温を使って月降水量を降雪水量と降雨量に分離した。分離に当たっては、月降水量は月平均気温が  $4.5^{\circ}\text{C}$  以上のときは全て降雨とし、月平均気温が  $0.5^{\circ}\text{C}$  以上で  $4.5^{\circ}\text{C}$  未満のときは降雨と降雪が気温によって比例配分されとした。また月平均気温が  $0.5^{\circ}\text{C}$  以下のときは、すべて降雪とした。こうして得られた降雪水量を降水量計の捕捉率で補正した。捕捉率とは、降水量計が実際の降水をキャッチする比率であり、大気の乱れによって降水の一部が計器に捕捉されない現象による誤差を示している。本研究ではこの捕捉率を、過去に新潟県上越市で観測した結果を基に、一律 0.8 として計算した。最後に、この月降雪水量を新雪の密度  $0.1\text{g}/\text{cm}^3$  で除して月降雪深を計算した。

最深積雪モデルでは、最深積雪を、1月の平均気温の2次式と12月から3月まで（以後、冬季とする）の期間降雪深とを説明変数とし、最深積雪を目的変数とする重回帰式によって推定した。

堆積環境モデルでは、石坂(1995)による区分をもとに、積雪地域を乾き雪地域、湿り雪地

域、中間地域、しもざらめ雪地域に区分した。乾き雪地域とは最寒期に積雪層が含水しない地域であり、湿り雪地域は含水する地域である。本研究では、1月の平均気温から乾き雪地域、湿り雪地域、中間地域を推定し、しもざらめ雪地域は石坂(1995)の式を使って推定した。

本モデルの月降雪深モデルに、1991年から1995年の冬季の月平均気温、月降水量の気象官署実測値を入力して、同月降雪深実測値と比較した。すなわち、最深積雪と堆積環境の推定モデルに、メッシュ統計値の月平均気温と同メッシュ形式で推定した冬季降雪深を入力して、メッシュ統計値の最深積雪や、石坂の結果および気候図と比較した。その結果、本モデルは十分な精度で現在の降積雪を予測できることが確認された。

## 2. 温暖化時における降積雪の予測

月平均気温、月降水量の数値実験予測値(横沢・鳥谷、1997)を空間的に補間したメッシュデータを入力とし、本研究で開発した降積雪推定モデルを使って温暖化時における国内の降積雪状況の変化を調べた。入力データとして複数の予測値を使ったが、結果は同様であった。

予測結果を地域別に述べると、北海道と本州山岳地域では、冬季降雪深と堆積環境は変わらなかったが、年降雪深と最深積雪は減少した。これは、この地域が現在でも冬季の気温が零度以下で充分低いため、数度の気温上昇では冬期の降積雪は変化しないということを意味している。年降水量と最深積雪が減少したのは、気温が高い晩秋と早春の降雪が減少したためであり、この地域は冬期前後に変化することがわかった。山岳地域を除く東北地域では、降雪深と最深積雪が大きく減少し、積雪の堆積環境は乾き雪から中間または湿り雪になった。同地域では、現在の冬季の気温が零度前後のため、気温上昇によって降水形態が雪から雨に変化すること、また気温上昇によってまず降雪深が減少し、融雪量も増加するという両面によって最深積雪が減少することが推察された。中部地方の盆地では、気温上昇によって堆積環境が乾き雪から湿り雪になったが、降雪深の減少量や最深積雪の減少量は少なかった。これは、冬季の降水量が少ないためと思われる。北陸地方以南の日本海側平野部では、気温上昇によって降雨・降雪の割合が変化し、21世紀中ごろには降雪・積雪が生じなくなった。

## 3. 降積雪の変化が及ぼす河川流量への影響

河川流量の変化を調べるため、現在から2090年にかけての各時期について、国内主要河川水系の流域ごとに降水量、降雪水量を集計した。その結果、調査対象とした全ての流域で、年降雪水量は温暖化の進行とともに減少した。年降雪水量の減少量は、東北・中部日本海側の河川で大きく、信濃川の減少量が最大であった。一方、現在の降雪水量に対する減少率は、西日本の河川で大きかった。現在の年降水量に対する2090年までの減少量の比は、東北・中部日本海側の河川で大きく、いずれも0.15を超えた。これらの河川では、積雪として貯留される水量の減少の影響が大きく、融雪期の河川流量の変化が懸念される。

以上の結果を主要河川の流域に適用し、流出モデルを用いて河川流量の変化を検討した。流出モデルでは、まずメッシュごとに、ディグリーデイ法によって月融雪水量を評価し、月降雨量との和を求めた。この和を流域で集計し、賦存係数(年平均降水量に対する平均水資源賦存量の比)を掛けたものを月流量と仮定した。この方法を現在の実測値と比較した結果、流量の季節変化が良く再現されており、流出特性の変化の検討に有効であることがわかった。そこで本流出モデルに2090年の気候値を入力し、温暖化時の流出特性の変化を調べた。その結果、太平洋側や西日本の河川では変化が小さかった。東北・中部日本海側河川では、降雪水量の減少により4月の流出ピークが消失し、冬季の降雨量の増加により、冬季の流量が増加することが分かった。4月は水稻移植期であるため、この地域では水田灌漑用水への影響が懸念される。また、北海道の河川では、2090年頃には流出のピークが1ヶ月弱早まることが分かった。

以上のように、本研究は、地球温暖化時における国内の降積雪の変化を新しく開発した内挿モデルを使って予測し、その結果を基に国内主要河川の流量変化を推定したものである。

本研究の手法と得られた結果は今後の地球温暖化に伴う国内の農林地の環境変化の把握とその対策に大きく貢献するものと考えられる。

# 学位論文審査の要旨

|    |     |       |
|----|-----|-------|
| 主査 | 教授  | 浦野慎一  |
| 副査 | 教授  | 長谷川周一 |
| 副査 | 助教授 | 谷宏    |
| 副査 | 助教授 | 平野高司  |

学位論文題名

## 地球温暖化時における 国内の降積雪の変化予測と河川流量への影響評価

本論文は5章からなる頁数91の和文論文で、図48、表2、引用文献51を含んでいる。他に参考論文8編が添えられている。

地球温暖化時における降積雪とそれに伴う河川流量の変化の予測は、農林生態系の管理や水資源対策の観点から重要である。水文現象の予測は、現在の水文モデルに単純に気温と降水量の増減を与えた計算が行われているが、この方法ではモデルが外挿となり精度が悪い。本研究は水文現象を精度よく予測することを目的に、内挿型の降積雪推定モデルを開発し、温暖化時における国内の降積雪分布と河川流量を予測した。

### 1. 降積雪推定モデルの開発

月降雪深推定モデル、最深積雪推定モデル、および積雪の堆積環境推定モデルの3つからなる降積雪推定モデルを開発した。月降雪深推定モデルでは、まず月平均気温を使って月降水量から降雪水量を分離し、得られた降雪水量を降水量計の捕捉率で補正した。捕捉率は、新潟県上越市で観測した結果（降雪の捕捉率0.8）を使用した。この月降雪水量を新雪の密度  $0.1\text{g/cm}^3$  で除して月降雪深を計算した。最深積雪モデルでは、最深積雪を、1月の平均気温と12月から3月までの期間降雪深を説明変数とする重回帰式によって推定した。堆積環境モデルでは、石坂(1995)による区分をもとに、積雪地域を乾き雪地域、湿り雪地域、中間地域、しもぢらめ雪地域に区分した。乾き雪地域とは最寒期に積雪層が含水しない地域であり、湿り雪地域は含水する地域である。本モデルに、1991年から1995年の冬季のデータを入力して降雪深実測値と比較した結果、本モデルは十分な精度で現在の降積雪を予測できることが確認された。

## 2. 温暖化時における降積雪の予測

月平均気温、月降水量の温暖化数値実験予測値を空間的に補間したメッシュデータを入力とし、降積雪推定モデルを用いて降積雪状況の変化を予測した。その結果、北海道と本州山岳地域では、冬季の降雪深と堆積環境は変わらなかったが、年降雪深と最深積雪は減少した。これは、この地域が現在でも冬季の気温が零度以下であるため、数度の気温上昇では冬季の降積雪は変化しないことを意味する。年降水量と最深積雪が減少したのは、気温が高い晩秋と初春の降雪が減少したためであり、この地域は冬季前後に変化することがわかった。山岳地域を除く東北地域では、降雪深と最深積雪が大きく減少し、積雪の堆積環境は乾き雪から中間または湿り雪になった。同地域では、現在の冬季の気温が零度前後のため、気温上昇によって降水形態が雪から雨に変化すること、また気温上昇によってまず降雪深が減少し、融雪量も増加するという両面によって最深積雪が減少することが推察された。中部地方の盆地では、気温上昇によって堆積環境が乾き雪から湿り雪になったが、降雪深の減少量や最深積雪の減少量は少なかった。これは、冬季の降水量が少ないためと思われる。北陸地方以南の日本海側平野部では、気温上昇によって降雨・降雪の割合が変化し、21 世紀中ごろには降雪・積雪が生じなくなった。

## 3. 降積雪の変化が河川流量に及ぼす影響

河川流量の変化を調べるため、現在から 2090 年にかけての各時期について、国内主要河川水系の流域ごとに降水量、降雪水量を予測した。その結果、調査対象とした全ての流域で、年降雪水量は温暖化の進行とともに減少した。年降雪水量の減少量は、東北・中部日本海側の河川で大きく、信濃川の減少量が最大であった。一方、現在の降雪水量に対する減少率は、西日本の河川で大きかった。現在の年降水量に対する 2090 年までの減少量の比は、東北・中部日本海側の河川で大きかった。

以上の結果を主要河川流域に適用し、流出モデルを用いて河川流量の変化を検討した。流出モデルでは、まずメッシュごとに、ディグリーデイ法によって月融雪水量を評価し、月降雨量との和を求めた。この和を流域で集計し、賦存係数（年平均降水量に対する平均水資源賦存量の比）を掛けたものを月流量と仮定した。この方法を現在の実測値と比較した結果、流量の季節変化の検討に有効であった。本流出モデルに 2090 年の気候値を入力し、温暖化時の流量の変化を調べた結果、太平洋側や西日本の河川では変化が小さかった。また東北・中部日本海側河川では 4 月の流出ピークが消失し、冬季の流量が増加することが分かった。北海道の河川では、気温上昇によって流出ピーク時期が早まることが分かった。

以上のように、本研究は、地球温暖化時における国内の降積雪の変化を新しく開発したモデルを使って予測し、その結果を基に国内主要河川の流量変化を推定したものである。本研究の手法と得られた結果は今後の地球温暖化に伴う国内の農林地の環境変化の把握とその対策に大きく貢献するものと考えられる。よって審査員一同は、井上聡が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。