

B-11 地球温暖化による水収支への影響評価に関する研究

(2) 積雪寒冷地の水循環への影響評価に関する研究

研究代表者 建設省土木研究所 益倉 克成

北海道開発庁 北海道開発局

開発土木研究所 水工部 部長 星 清

環境研究室 吉井 厚志

中津川 誠

河川研究室 清水 康行

平成 2-4 年度合計予算額 13,210 千円

[要旨] 積雪寒冷地流域での温暖化の影響を評価するため、最初に既往気象・水文データを収集、解析した。これから北海道でも過去 100 年間で気温の上昇がみられ、近年は降水量の減少と年最大日雨量、豪雨日数の増加傾向がみられ、降雨の集中化を示唆するような結果が得られた。つづいて、モデル流域を設定し、積雪量、融雪流出の把握と解析が実施された。ここでは、航空写真や衛星情報などのリモートセンシング情報を活用して、流域の積雪量の推定精度の向上を図り、融雪流出パターンを的確に把握した。これをもとに、大気大循環モデルで推定される温暖化時の気温上昇では、融雪流出期間が 20 日ほど早まることが示唆された。最後に、融雪を含む年間を通じた流出パターンを再現、評価した。ここでは、長短期流出両用モデルを構築し、温暖化時の気温、降水量の変化によって、流出パターンがどのように変化するか推算した。

[キーワード] リモートセンシング、積算暖度法、融雪流出、長短期流出両用モデル

1. 序

地球温暖化が水循環のパターンに影響を与え、結果として河川への出水形態や水資源量の変化など、河川計画・管理に少なからず影響を及ぼすことが懸念される。これに対して適切な対策を講じていくためには、温暖化による降水、蒸発散、流出過程の変化を地球規模で、またそれを境界条件に流域規模で評価しうる手法を開発することが必要である。特に積雪寒冷地においては、積雪、融雪の状態変化が水循環に大きな影響を及ぼすので、その面での評価が不可欠である。本研究では、積雪寒冷地流域での温暖化の影響を評価するため、融雪を主眼とした水循環に関するモデル化をおこない、温暖化のシナリオを与えた場合の影響を分析した。

2. 研究目的

温暖化との因果関係は検証されていないものの、水資源上雪への依存度の大きい北海道各流域では、近年積雪量の減少がみられ、渇水問題への懸念が高まっている。このような積雪寒冷地流域の水文環境を踏まえ、地球規模での環境変化にともなう水循環の変化を把握し、将来の河川・ダム計画や管理を考えていくことが必要である。

本研究では、降雪、積雪、融雪、流出といった水文現象を解析し、積雪寒冷地流域における水収支の実態を明らかにしてそれをモデル化する。特に、雪に起因する水循環については、これまで扱ってきた事例が少ないため、積雪水量の的確な推定手法の確立を目指す。

以上で得られた水循環モデルに気候モデルから得られる諸条件を組み込んで、環境変化が積雪寒冷地流域の水文・水資源へ与える影響を評価する。

3. 研究方法

(1) 過去の気象データの傾向分析

平成2年度は、北海道の既往気象・水文データを整理し、過去の気候変化の状況を把握した。ここでは、過去の気候変化の動向とともに、温暖な時期と寒冷な時期でどのような水文的特徴が現れるかを整理した。また、モデル流域を定め、水循環のモデル化のために必要となる気象、水文データを収集・整理した。

(2) 積雪量と融雪流出量の推算

平成3年度は、北海道の流域における積雪と融雪流出の実態を、札幌近郊の定山溪ダム流域を対象に検討した。流域の概略は図1に示す。定山溪ダムは石狩川水系豊平川の支川である小樽内川の下流にあり、集水面積は104km²である。ここで衛星情報もしくは航空写真を用いて融雪期における雪線の推移を捉え、それに積算暖度法を適用して融雪流出量の推定を試みた。

積雪量推定手法のフロー図を図2に示す。この中で、融雪開始日と融雪係数（デグリーデイファクター）については観測されている気温データと積雪深データより推定する。次に、融雪期に入り流域の積雪面積が減少していく様子を衛星画像や航空写真を利用して把握する。ここでは撮影した写真から積雪分布図を作成し、雪線抽出図を作成する。この雪線上において融雪量を推定する点を設定する。この推定点で積算暖度法を適用し、融雪開始日から撮影日までの融雪量を算定する。結果として融雪開始日からの融雪量が、最大積雪量と推定される。以上で得られた点積雪量を内挿し、積雪量分布図を作成する。これを標高帯別に整理し、面積を掛けて流域内全積雪量を推算することができる。

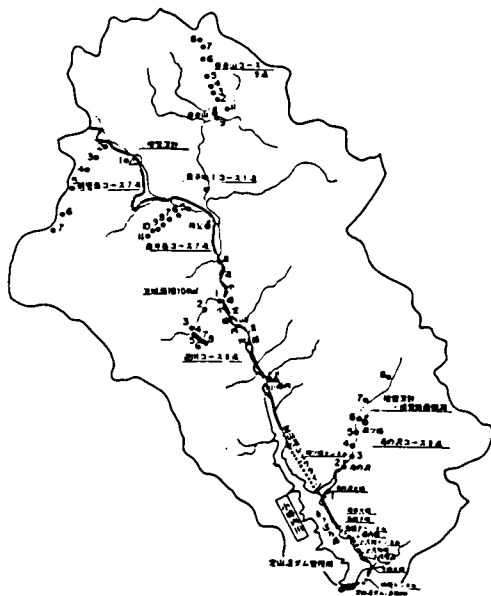


図1 定山溪ダム流域の概要

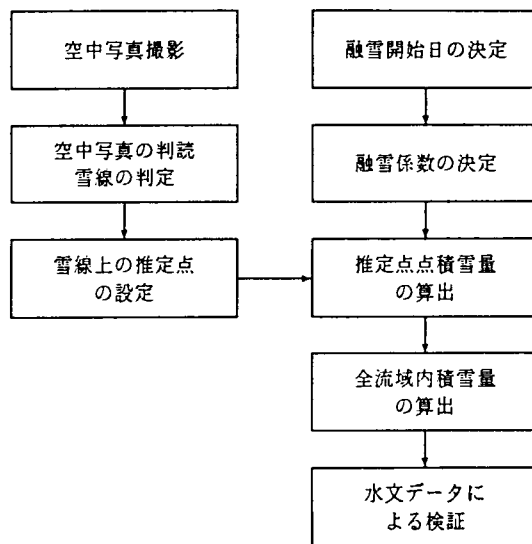


図2 航空写真を用いた積雪量推定のフロー

積雪量を把握した上で、標高ブロック毎に積算暖度法を適用し、日々の融雪量を求める。また、成分分離 AR 法により、流出量をいくつかの流出成分に分離し、成分毎の流出遅れ

や流出の原因となる降水量を逆推定した。ここでは1991年と1992年の2カ年にわたる無雪期の流量データを成分分離AR法によって解析し、地下水流出成分が表面・中間流出成分より1日の流出遅れを生じ、その配分率は、全流出量の50.1%に相当することを明らかにした。また、流出量より逆算された降水量から、それがダムサイトでの観測値の1.15倍となっていることを見いだした。

このようにして構築した融雪流出モデルに温暖化にともなう気温変化を与え、応答をみた。この温暖化のシナリオについては、大気大循環モデルの出力をもとに作成された気候メッシュ情報から得た。

(3) 年間流出パターンのモデル化

年間を通した中長期的な流出パターンを把握するため、長短期流出両用モデルを構築し、現況の流出パターンの再現をおこなった。モデルの構造を図3に示す。ここで用いられるモデル定数は、Powellの共役方向法によって同定した。また、先の知見を生かし、積雪寒冷地流域の入力値として重要な積雪量はリモートセンシング（航空写真、衛星）手法、融雪量は積算暖度法によって与えているほか、降雨量はダムサイト観測値を1.15倍して与えた。また、蒸発散量は、ダムサイトでの観測値による検証をおこなったうえ、Thornthwaite法により算出した。

このようにして構築した流出モデルに温暖化にともなう気温変化および降水量変化を与え、応答をみた。この温暖化のシナリオについては、大気大循環モデルの結果等で得られている一般的な値をいくつか設定して与えている

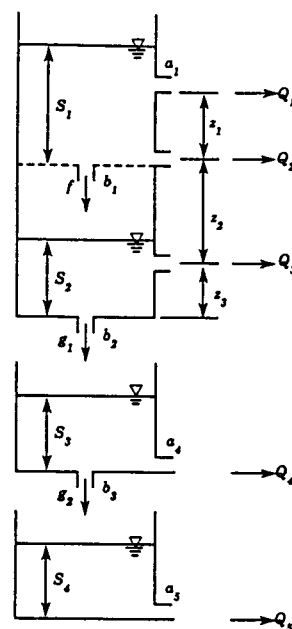


図3 長短期流出両用モデルの構造

4. 得られた結果と考察

(1) 過去の気象データの傾向分析

図4には寿都における年平均気温の10年移動平均を示す。他の個所でも同様な傾向がみられ北海道各所においても、過去100年で気温の上昇が認められる。ただし、札幌での気温上昇は過去100年で2°C程と顕著であり、これは都市化の影響といった局地的な要因によると考えられる。寿都は比較的自然的バックグラウンドで気温が推移しているように見え、過去100年で約0.4度の気温上昇が示されている。また、特に最近10年あまりの気温上昇は特に顕著である。

図5には年間総降水量の変化を10年移動平均で示してある。過去100年の変化は凸型を示しており、1920年代から1970年代にかけては変動はあるものの全体として多いレベルで推移したものが、近年減少傾向が顕著である。このような傾向は、冬期や夏期の季節別の降水量についても同様に現れている。

つづいて、北海道における温暖な時期と寒冷な時期を抽出し、降水に関してどのような特徴があらわれるか整理した。最初に、過去の気温データから寒冷な10年と温暖な10年を10年移動平均の結果をもとに抽出したところ、前者が1904~1913年（寒冷期）、後者が1955~1964年（温暖期1）および1982~1991年（温暖期2）となった。この際、道内5箇所について両期間の年平均気温の10年平均値を考えた場合、温暖期の方が0.4~2.3°Cの間で寒冷期に比べ年平均気温が高くなっていた。ここで両期間の降水パターンをみる。図6では夏期間の豪雨日数として6~9月で30mm以上の雨が降った日数を比較している。なお、日数は10年間の合計値である。これから、温暖期においては寒冷期と比べ豪雨日数において多くなる傾向（温暖期1で顕著）が示された。さらに図7には年最大日降水量（10年平均値）をあらわすが、これをみると、明らかに温暖期の方が大きい値を示していることがわかる。以上の結果は、気候が温暖化することで夏期には総降水量は変わらなくても、一回あたりの降水量が増えたり、あるいは最大値が大きくなるような傾向を示唆するものである。

(寿都)

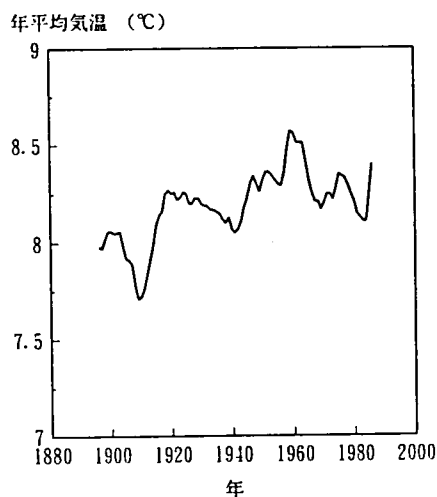


図4 年平均気温
(10年移動平均)

(寿都)

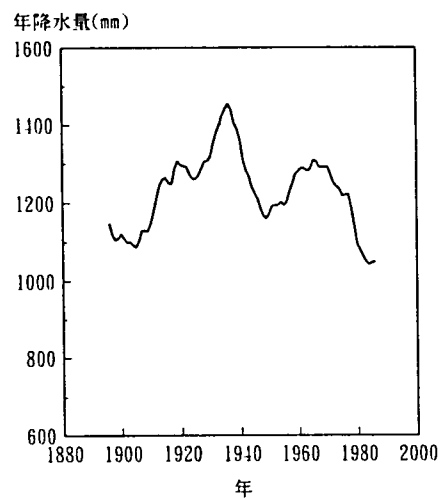


図5 年間総降水量
(10年移動平均)

温暖期豪雨日数(日)

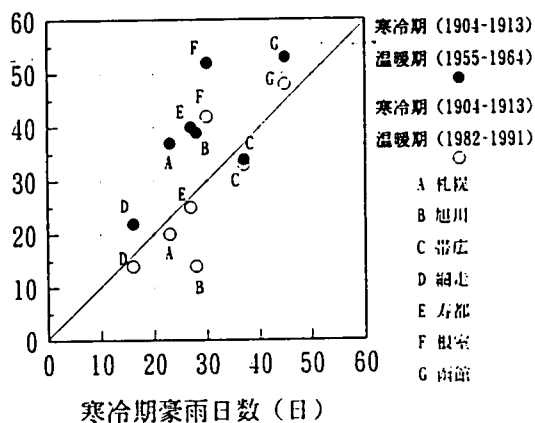


図6 温暖期と寒冷期の
豪雨日数(10年合計)

温暖期最大日降水量(mm)

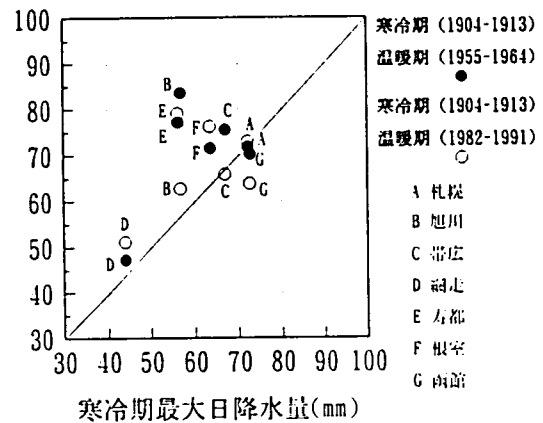


図7 温暖期と寒冷期の
年最大日降水量(10年平均)

(2) 積雪量と融雪流出量の推算と解析

気温の上昇や冬期間の降水量の減少という問題意識のもと、そのような変化で雪に関わる水文的環境がどのようになるか調べる必要がある。そのためには現状での積雪量や融雪流出の実態を表現しうるモデルの構築が必要となる。そこで、前節で解説した方法論により、定山溪ダム流域を対象に積雪量と融雪流出量の推定を図る。

最初に航空写真で判読された雪線情報から積雪量、すなわち融雪期間中に流出する全融雪量を算出し、融雪に係わる水収支を検証した。図8には推定値とダム流入量観測値を比較した結果を掲載している。推定値は、積雪量に融雪期間中の降雨量と基底流量分を足しあわせたもので、積雪量に関しては、航空写真と積算暖度法を適用して推算したものと、スノーサーベイの結果から算定したものを示して比較している。図には1991~1993年の結果を示してある。この3カ年の結果から、定山溪ダム流域では積雪調査の結果が、一般的に積雪量を5割前後も過大に与えていることがわかるとともに、航空写真とデグリーデイ法の利用により、実用的に十分な精度で積雪量を算定できることがわかった。よって、本手法が流域の水収支を評価するため利用可能であることが確認された。

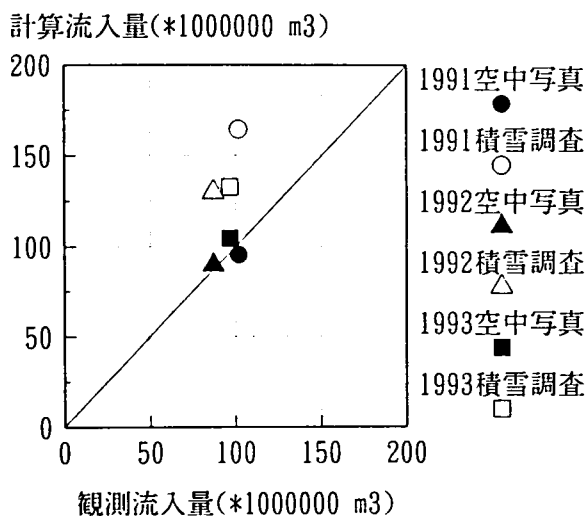


図8 計算融雪流出量をもとにした水収支の検証

次に積算暖度法とAR法による流出成分の流出遅れを考慮することにより、日融雪流出量を算定した。計算されたダム流入量の累加値を実測値とともに図9に示す。また、日単位のダム流入量についても図10に示す。以上から、積雪量を的確に与えれば実用上十分な精度で、日単位のダム融雪流入量を推定できることが確認できた。なお、成分分離は1991年と1992年の2カ年のデータのみからおこなっているにすぎず、汎用的な評価のためには今後ともデータの蓄積を図っていく必要がある。

(1992)

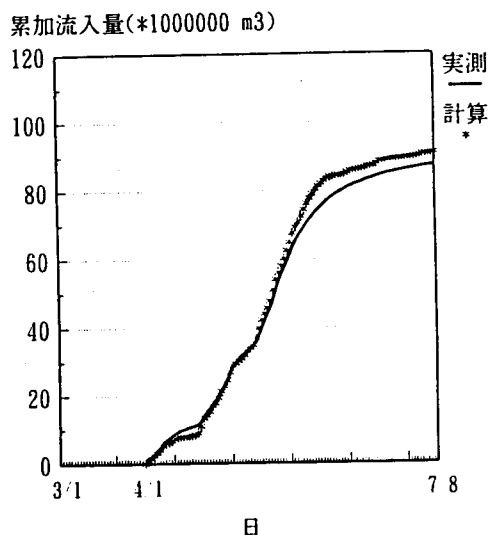


図9 推算された累加ダム流入量

(1992)

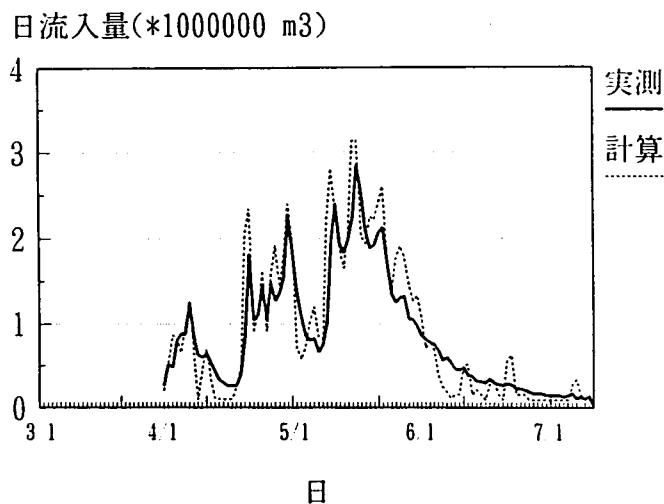


図10 推算された日融雪流出量

次に積算暖度法に基づいた融雪流出モデルに温暖化シナリオを与え、流出に対する応答をみる。現在、気候変化に関し、最も信頼できるシナリオを与えるのが大気大循環モデル(GCM)のアウトプットである。ここでは現状および二酸化炭素倍増時の気温のメッシュ情報を参考にする。メッシュのスケールは10kmで、気候計算に用いた大気大循環モデルはGISS modelである。ただし、GCMの計算結果については、数百kmのスケールをもつアウトプットを内挿によって10kmのメッシュ値としているので、基本的にはGCMの解像度を越えるものではない。図11には、現状と二酸化炭素倍増時における札幌南部の気温メッシュ値を示す。結果は二酸化炭素倍増時に月平均気温で3~4°上昇することをあらわしている。なお、降水量に関しては気温変化と違い、地域的な較差がかなり出てくると考えられる。よって、このような評価にGCMの情報を用いるには、より細かいモデル化が必要である。

定山溪ダム流域を対象に、単純に気温をメッシュ値どおりに上昇させた場合に融雪流出パターンの変化をみる。当流域では現状の融雪開始日が3月30日頃であった。二酸化炭素倍増による気温上昇量を、現状の日平均気温傾向値(3月から6月までの気温変化を直線回帰式により求めた値)に付加し、積算暖度法を適用して日融雪流出量(降雨流出量は含まない)を計算した。結果を現状の融雪流出量とともに図12に示す。融雪流出のピーク時として、波形の重心となる日を求めると、1991年は5月15日にあったものが4月28日に、1992年は5月17日にあったものが4月27日へと、気温上昇によってほぼ同様に变化した。すなわち、融雪期間が現状より約20日早まるという結果となった。

(1992)

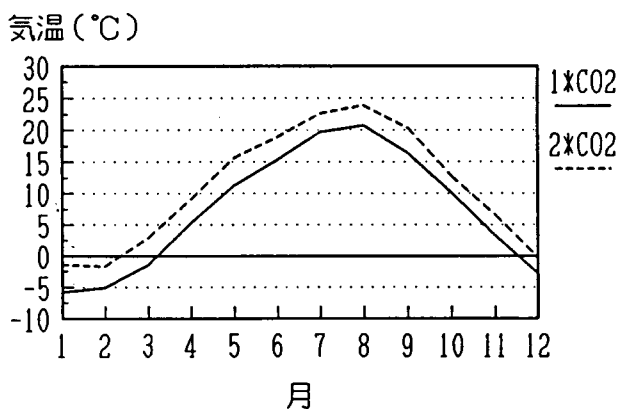


図11 月平均気温の気候メッシュ情報
(札幌南部)

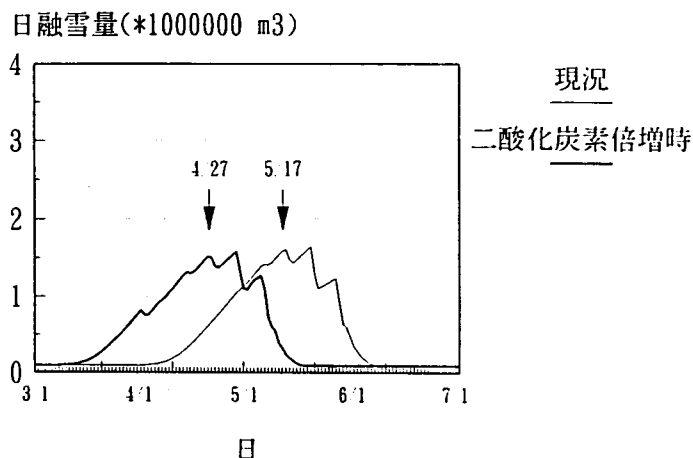


図12 日融雪流出量の変化
(現状およびCO₂倍増時)

(3) 年間流出パターンのモデル化と解析

長短期流出両用モデルに汎用性をもたせるために、1991年と1992年の2カ年の流出量データにPowell法を適用してパラメータを同定し、それを集約化した。これによって年間流出パターンを算出した結果を図13に示す。再現結果を実績流出量と比較すると、夏期の細かい変動については若干の差はみられるものの、融雪流出を含め、全体的な流出パターンの再現は良好であることが確認された。

構築された長短期流出両用モデルに、気温や降水量の変化を温暖化のシナリオとして与えて年間流出パターンの変化を評価する。この際、設定したシナリオは次の6通りとした。

1. 気温 2°C 上昇、降水量変化なし
2. 気温 4°C 上昇、降水量変化なし
3. 気温 2°C 上昇、降水量 10% 減少
4. 気温 4°C 上昇、降水量 10% 減少
5. 気温 2°C 上昇、降水量 10% 増加
6. 気温 4°C 上昇、降水量 10% 増加

図14には、長短期流出両用モデルで算出した月流出高について、気温が2°C上昇し、降水量を変化した場合の応答を現状値との比較において示している。これらから、気温変化により流出のピークは5月から4月へと明瞭に早まっていることがわかる。特に積雪寒冷地流域の場合、融雪流出量が年間の水収支の中で卓越しており、降水量の変化よりも、気温上昇による融雪流出期間の変化が、水循環パターンにより大きな影響を与えているようにみえる。

以上の結果より積雪寒冷地流域の場合、融雪流出量が年間の水収支の中で卓越しており、降水量の変化よりも、気温上昇による融雪流出期間の変化が、水循環パターンにより大きな影響を与えているようにみえる。また、年間の流況についてみると、北海道の場合、降雨による流況変化より融雪が卓越することで流況が平滑化され、温暖化による影響はさほど顕著にあらわれていなかった。

(1992)

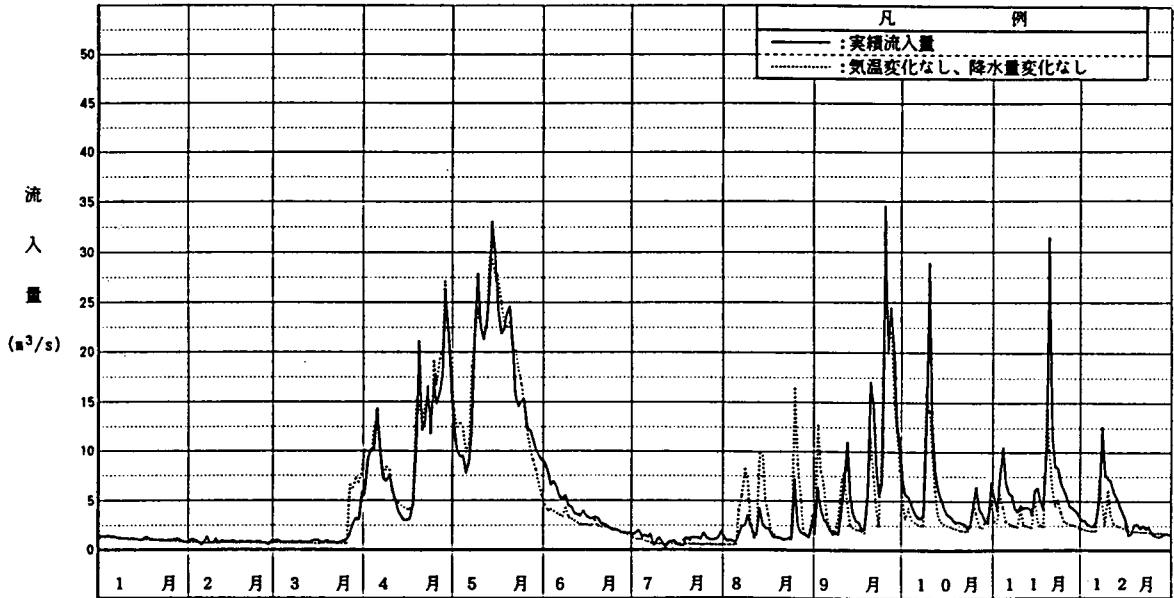


図 13 長短期流出両用モデルによる年間流出パターンの再現結果

(1992)

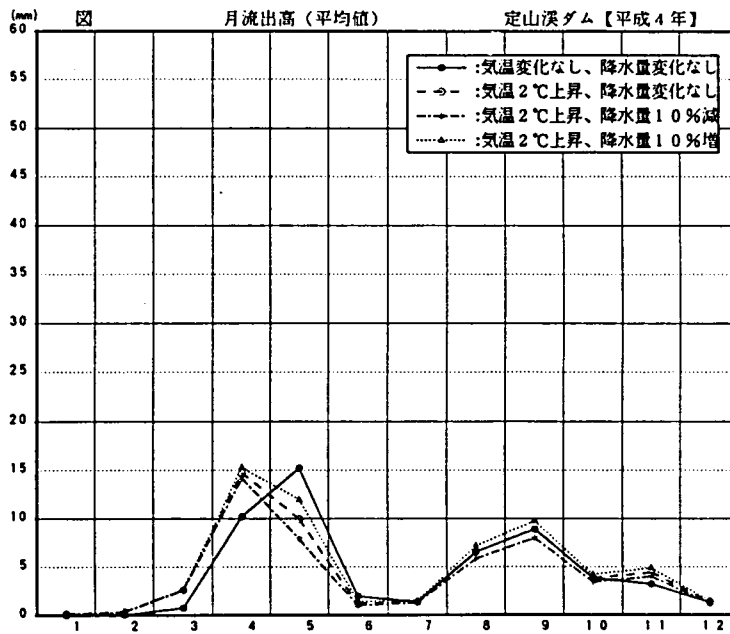


図 14 月流出高の変化 (気温 2°C 上昇)

5. まとめ

過去 100 年程度の北海道における気象・水文データの整理を通し、過去の環境変化の動向が把握され、各地で気温上昇がみられるとともに最近は特に降水量の減少が顕著であるなどの特徴が示された。しかしながら、過去の温暖な時期では寒冷な時期と比較して年最大日雨量の増大や豪雨日数の増加などの傾向がみられた。

また、積雪寒冷地のダム流域を対象にリモートセンシング情報と積算暖度法を適用して積雪量を推算した。この際、積雪域を捉えるために衛星画像や航空写真の活用が有効であることを示した。これによって、写真から抽出された点の融雪量をデグリーデイ法を適用して推定し、それらを積分することで流域全体の融雪量、すなわち積雪量を把握することが可能となった。

次に、積算暖度法による融雪量の推定と、AR法に基づき流出遅れを考慮することで流域からの融雪流出量を日単位で把握することができた。また、長短期流出両用モデルにより年間流出パターンのモデル化を図り、融雪流出を含む現況の流出パターンを的確に再現することができた。この際に、先述した積雪量の推定結果や積算暖度法による融雪量の推定法が反映された。

最後に、このようなモデルに温暖化のシナリオを導入し、融雪流出パターンの変化を調べた。ここで用いた気温変化のシナリオは、GCMのアウトプットをもとにしたメッシュ情報で、これをデグリーデイ法に適用した結果、二酸化炭素倍増によって融雪流出は20日程度早まることが試算された。また、長短期流出両用モデルで評価される年間流出パターンについては、積雪寒冷地流域では、降雨流出に比較して融雪流出の寄与が水収支上卓越しており、後者の動向が流出パターンに影響を与えることを示唆した。すなわち、気候変化にともなって想定されるシナリオのうち、降水量の変化よりも気温変化による融雪期間の変化の方が、水循環のうえで大きな影響をもたらすと言える。

今後、わが国でも $10^{-1} \sim 10^3 \text{ km}^2$ スケールの流域を対象に、温暖化に対する水文応答が調べていく必要がある。本研究は、その一環として実用的なモデルをベースに、積雪寒冷地流域での流出パターンへの影響を示唆したものである。

6. 本研究により得られた成果

本研究により得られた成果を具体的にまとめる。

- (1) 北海道各地でも過去100年で気温は上昇傾向にある。
- (2) 過去の降水特性を調べると、最近降水量の減少が顕著である一方、年最大日雨量の増大がみられ、降水強度の増加傾向が判断される。気温との関係で、これが温暖期の降水特性として示唆された。
- (3) リモートセンシングによる雪線の抽出と積算暖度法の適用によって、ダム流域における積雪量を推定した。これによって水収支の検証をおこない、手法の妥当性を確認した。
- (4) リモートセンシングを利用して積雪量を推算し、それに積算暖度法を適用して日融雪量の算定をおこなった。また、AR法から推定した流出成分の時間遅れを考慮し、融雪流出のモデリングをおこなうとともに、年間を通しての流出パターンを長短期流出両用モデルによって表現した。
- (5) 気候モデルによって算定された結果に基づき、温暖化による気温上昇量を積算暖度法への入力条件として、融雪流出パターンへの応答をみた。これによって、二酸化炭素の倍増がもたらす $3 \sim 4^\circ\text{C}$ の気温上昇は融雪流出期間を20日程度早めることを示した。

- (6) 温暖化による気温上昇や降水量変化に関し、いくつかのシナリオを設定し、先に構築した長短期流出両用モデルにより年間の流出パターンの応答をみた。この結果、北海道の場合、降水量の変化より気温変化による融雪期間の変化が、年間の流出パターンに大きな影響を与えることが示された。

8. 参考文献

- 1) 中津川誠, 1990: 雪に係わる水文現象を扱った既往知見について－関連論文のレビュー－, 北海道開発局開発土木研究所月報, 443, 24-40.
- 2) 中津川誠, 西村豊, 畑敏夫, 1992: リモートセンシングを用いたダム流域融雪量の算定について, 第36回北海道開発局技術研究発表会講演概要集ダム・砂防部門, 287-292.
- 3) 中津川誠, 1992: 気候変動の評価手法(モデル)について, 開発土木研究所月報, 470, 23-35.
- 4) 中津川誠, 西村豊, 1992: 地球温暖化による融雪流出パターンの変化について, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, 658-659.
- 5) 中津川誠, 1992: 地球温暖化の水循環への影響について, 北海道開発局開発土木研究所月報, 473, 44-54.
- 6) 秀島好昭, 星清, 1990: Degree-day法にランドサットデータを活用した融雪流出解析－北海道の山岳地の融雪流出に関する研究(II)－, 農業土木学会論文集, 148, 19-24.
- 7) 秀島好昭, 星清, 1990: 成分分離AR法による徳富川流域の流出解析－北海道の山岳地の融雪流出に関する研究(I)－, 農業土木学会論文集, 148, 11-17.
- 8) 田中丸治哉, 角屋睦, 1991: 流域水循環に対する気温上昇の影響評価, 水文・水資源学会1991年研究発表会要旨集, 142-145.
- 9) 清野裕, 1990: 農業環境研究におけるメッシュデータと気象情報の利用(2), 農業および園芸, Vol.65, No.8, 35-41.