

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) 積雪寒冷地流域の水文・水資源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 河川部 水文研究室 寺川 陽

北海道開発庁 北海道開発局 開発土木研究所
環境水工部 部長 水野 雄三
環境研究室 許士 裕恭
中津川 誠
河川研究室 井出 康郎

平成5-7年度合計予算額 8,829千円
(平成7年度予算額 2,743千円)

[要旨]積雪寒冷地における広域の流域での水循環については、これまで未着手の課題であったが、地球環境問題を考える上で今後検討すべき問題である。本試験研究の中では積雪寒冷地流域の水循環過程として、降水、積雪、蒸発散の現況について推算をおこなった。また、地球温暖化のシナリオのもとでそれらがどのように変化するかを試算した。ここでの検討対象は、流域面積が14,330km²である石狩川流域とした。

降水量については、流域内気象データから推算したが、観測点の少ない山地部については、標高による補正をおこない、算出した。積雪水量については、人工衛星（空中写真、LANDSAT、MOS-1、NOAA）画像から雪線を捉え、雪線上の点に積算暖度法をあてはめて推定した。なお、積雪水量の推定手法については、定山溪ダム流域（104km²）、豊平川流域（雁来地点、650.6km²）における検証をおこなったうえで石狩川流域（石狩大橋地点、12,696.7km²）に適用した。蒸発散量については、流域内気象データからThornthwait法、Hamon法およびPenman法といった推定式によって推算した。これらによって推定した有効降水量と河川からの流出量を比較し、水循環過程を水収支的に検証した。

次に、気象研究所の大気大循環モデル（MRIGCM）をもとに、土木研究所とカリフォルニア大学で構築されたメソスケールモデルで計算された地球温暖化のシナリオ（二酸化炭素が現状の2倍となった場合）を入手した。それによって、積雪寒冷地流域の水循環がどのように変化するか推算した。本シナリオによれば、北にいくほど温暖化にともなう気温の上昇量は大きくなり、それともない降積雪量の減少と融雪期の早まりが顕著となるような結果が得られた。

以上のような積雪寒冷地流域の水循環の現状分析と地球温暖化による変化を踏まえ、今後の河川・ダムの計画、管理を考える上での基礎資料を得ることができた。

[キーワード] 地球温暖化、広域水循環、水収支、積雪寒冷地流域、工衛星画像

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、積雪、融雪、蒸発散、流出の変化を評価する手法の開発が必要である。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、リモートセンシング技術の活用により、広域的な降水量、積雪水量、蒸発散量を水収支上妥当な値として推算した。また、地球温暖化のシナリオのもとで、それらの現状からの変化を試算した。

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必要がある。

本研究では、降水、積雪、蒸発散といった水文量を、流域内の水収支を検証した上で推算した。特に、雪氷現象に関連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、リモートセンシング技術等を活用し、広域的な積雪水量の推定手法を確立した。また、降水量や蒸発散量についても、気象データ等から流域全体での推算をおこなった。さらに、二酸化炭素倍増時における地球温暖化のシナリオを用い、降水、積雪、蒸発散の状態が現状からどのように変化するか試算した。これらによって、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ことを目指す。

3. 研究方法

長期的視野でみると、流域の水収支は次のように表される。

$$Q = R - E \pm \Delta S \quad (1)$$

ここで、 Q は流域からの流出量、 R は降水量、 E は蒸発散量、 ΔS は流域全体の貯留水量差をあらわす。流域全体で水循環の実態を解明するには降水量と蒸発散量の把握が境界条件として必要不可欠となる。また、北海道のような積雪寒冷地の場合、積雪による長期間にわたる水の貯留と春先の融雪は年間の水循環に大きな役割を果たしており、その把握が必要である。以下に本研究でおこなった広域的な降水量・蒸発散量・積雪水量の推定手法を示す。また、地球温暖化によるこれらの変化を試算するため、気象変化シナリオの設定方法を示す。

(1) 降水量の推定

広域的な降水量の把握には、地点ごとに計られている雨量データに面積の重みをつけて推定するのが一般的である。今回は気象庁の気象官署、アメダスデータを流域全体で収集し、Thiessen法によって面積雨量を推定した。この際、山地流域の降雨量は一般に平地より多く、広域的な降雨量を推算する場合、標高による補正が必要と考えられる。そこで、総降雨量が大きくなるほど標高に比例して降雨量が増加するような補正を行っている。

(2) 積雪水量・融雪量の推定

積雪寒冷地においては、水資源および防災上（融雪出水）の観点から積雪水量と融雪流出量を

的確に把握する必要がある。積雪水量の把握については、流域の踏査によるスノーサーベイが一般的であるが、遭難の危険性などから場所と時期が限定されるとともに、空間的には線上での積雪水量しかわかり得ないため、それを流域全体に拡張する際に誤差が生じる場合がある。そこで、各種リモートセンシングの活用が考案されている。リモートセンシング利用した積雪水量の推定手法を以下に示す。

- ①積雪域の抽出；本研究で用いたリモートセンシング情報は、航空機から撮影した空中写真、人工衛星（LANDSAT, MOS-1, NOAA）で、1)幾何補正、2)フォールスカラー画像の作成、3)積雪域の抽出という手順をとり、積雪分布図を作成する。
- ②雪線の抽出；積算暖度法による融雪量算定のため、積雪域と無積雪域の境界である雪線を、積雪分布図から抽出する。
- ③モデルパラメータの設定；1)融雪開始日、2)融雪終了日、3)Degree-Day factorを決める。融雪開始日は、各点の日平均気温が0℃以上となる日として、融雪終了日は、流量データから融雪流出が十分に終了したと考えられる日として、Degree-Day factorは、結果の再現性などから試行錯誤的に、それぞれ設定している。
- ④雪線上の推定点の設定および地点積雪水量の算出；抽出された雪線上で地点積雪水量算出のための推定点を設定する。推定点は対象域内で均一に分布するようにし、それらにおいて、Degree-Day法で単位面積あたりの融雪量、すなわち積雪水量を算定する。このとき、任意点のDegree-Day法に適用する気温は、アメダス、気象官署のデータを標高補正したものである。
- ⑤流域全体の積雪水量の算出；上記で得られた地点積雪水量を流域内で内挿し、全体の積雪水量を求める。

（3）蒸発散量の推定

本検討においては、1)Thornthwaite式、2)Hamon式、3)Penman式を用いて蒸発散量を求めた。ただし、これらの手法は可能最大蒸発散量を求めるもので、実際の蒸発散量を推定するには補正が必要である。しかしながら、それに関しては未だ不明な点が多いので、補正は行わず、参考値として可能最大蒸発散量の値を用いた。

（4）地球温暖化のシナリオ設定

気象研究所大気大循環モデル（MRIGCM）をもとに、土木研究所とカリフォルニア大学で構築されたメソスケールモデルで計算された地球温暖化のシナリオ（二酸化炭素が現状（ $1 \times \text{CO}_2$ ）の2倍となった場合、（ $2 \times \text{CO}_2$ ）を用いた。この中では、温位、混合比、風速、降水量がモデルの第1層（ $\sigma=0.995$ ）出力値として12hr毎に与えられている。2×CO₂の場合の各々の与え方を以下に示す。

①気温の設定

2×CO₂の場合の気温T₂は、次のように与えられる。

$$T_2 = T_1 + \Delta T = T_1 + \tilde{\theta}_2 (P_0 / \tilde{P}_2)^{-R/C_p} - \tilde{\theta}_1 (P_0 / \tilde{P}_1)^{-R/C_p} \quad (2)$$

ここで、T、θ、Pはそれぞれ地上気温、温位（σ=0.995）、気圧を、添字の $\tilde{}$ 、1、2は各々モデル出力値、現状値、2×CO₂時に想定される値を意味する。また、P₀、R、C_pは、それぞれ基準気圧（1,000hPa）、空気の気体定数、定圧比熱をあらわす。

②降水量、風速、相対湿度の設定

2×CO₂の場合の降水量R₂、風速v₂、相対湿度rh₂は、各々次のように与えられる。

$$R_2 = \tilde{\alpha}_R R_1, \quad v_2 = \tilde{\alpha}_v v_1, \quad rh_2 = \tilde{\alpha}_{rh} rh_1 \quad (3)$$

ここで、R、v、rhはそれぞれ降水量、風速、相対湿度を、 $\tilde{\alpha}_R$ 、 $\tilde{\alpha}_v$ 、 $\tilde{\alpha}_{rh}$ はそれぞれ1×CO₂時に対する2×CO₂の降水量、風速および相対湿度の比をあらわす。なお、降水量から降雨量と降雪量を判別するには、気温が0℃以上を降雨、以下を降雪とした。

以上によって与えられる基本的な気象データにより、2×CO₂時の年降水量（年降雨量、年降雪量）年最大積雪水量、年蒸発散量を試算する。なお、年降水量と年降雨量の差が年降雪量となり、積雪水量はそれに比例すると考えられる。そこで、2×CO₂時の年最大積雪水量は、1×CO₂と2×CO₂の年降雪量の比率を求め、現状の年最大積雪水量にそれを乗じることで推算した。

4. 得られた結果と考察

ここでは、上記手法による年降水量、年最大積雪水量、年蒸発散量の推定結果を示し、河川流出量（年総流出量）と比較し、水収支上の評価をおこなった。また、それらが地球温暖化のシナリオのもとでどのように変化するかを示す。検討の対象とした流域と年次は、1987年、1989年、1992年の石狩川流域である。石狩川は幹川流路延長268km、流域面積14,330km²（石狩大橋地点での流域面積12,696.7km²）の日本有数の河川である。なお、積雪水量の推定法は、石狩川流域への適用に先立って、定山溪ダム流域（ダムサイトでの流域面積104km²）、豊平川流域（雁来地点での流域面積650.6km²）を対象として検証している。図1に各流域の位置関係を示す。

(1) 年降水量の推定結果

石狩川流域の平均降水量と降雨量成分は、各地点から最近隣の気象観測所（アメダス、気象官署）の降水量データを用いて推算した。降雨量成分は気温の標高による線形補正を行い、気温が0℃より高い場合に降雨量とした。推定例として1989年における年降水量の分布を図2に示す。

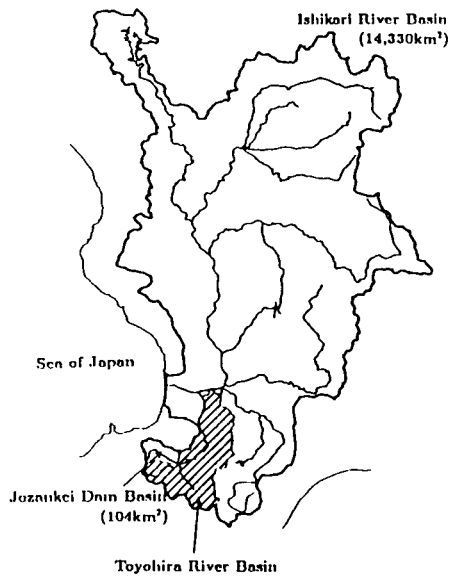


図1 石狩川流域の概要図

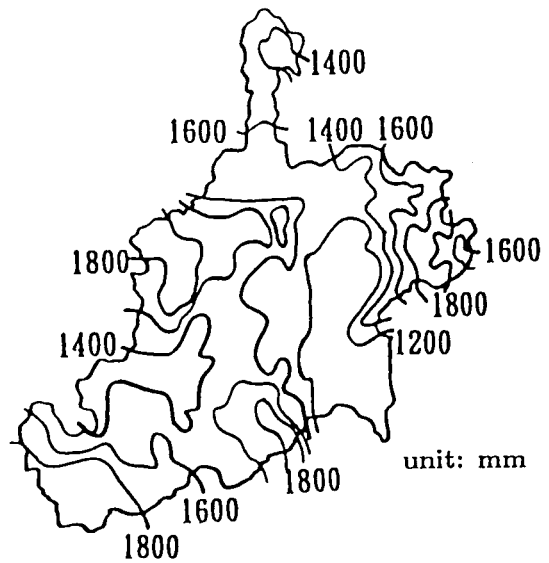


図2 年降水量の推定例(1989)

(2) 年最大積雪水量の推定結果

年最大積雪水量については、石狩川流域での推定に先立って定山溪ダム流域、豊平川流域で推定をおこなった。この際、定山溪ダム流域には空中写真、豊平川流域には人工衛星画像 (LANDSAT TM, MOS-1 MESSR) を適用した。得られた結果を表2に示す。このとき用いたDegree-Day factorは、流量データから逆探法 (成分分離AR法) で求めた融雪量と、Degree-Day法で計算される融雪量を比較して決定した。結果として、定山溪ダム流域では $0.33(\text{g}/\text{cm}^2/\text{C}/\text{day})$ 、豊平川流域では $0.37(\text{g}/\text{cm}^2/\text{C}/\text{day})$ という値を採用した。また、融雪開始日の設定には、定山溪ダム流域では、ダム気象観測所の日平均気温を、豊平川流域では、札幌管区気象台の日平均気温を用いた。

表1 定山溪ダム流域、豊平川流域での年最大積雪水量の推定結果

a) 定山溪ダム流域					b) 豊平川流域			
年	1991	1992	1993	1994	年	1987	1990	1992
積雪水量 (mm)	471	549	674	771	積雪水量 (mm)	518	605	493
融雪期間	4. 4-7. 31	3. 30-7. 17	4. 1-7. 27	3. 11-7. 31	融雪期間	3. 11-7. 31	2. 20-7. 31	3. 3-7. 31
流出高 (mm)	977	837	982	1, 214	流出高 (mm)	1, 057	917	738

石狩川流域の年最大積雪水量の算出には、NOAA AVHRRデータを用いた。ここで用いたDegree-Day factorは、推定された積雪をDegree-Day法で融かした場合に再現される雪線と、NOAA画像から判読される雪線との整合性から求めた。結果として、 $0.58\text{g}/\text{cm}^2/\text{C}/\text{day}$ という値を採用した。また、融雪開始日は流域内に位置する27地点のアメダス観測所の日平均気温から直線回帰を求め、気温が 0C を越える日とした。図3には推定例として1989年における年最大積雪水量の分布を示す。

(3) 年蒸発散量の推定結果

蒸発散量は、可能最大蒸発散量としてThornthwaite式、Hamon式、Penman式を用いて算出した。ここで使用した気象データは、石狩川流域内で4要素 (降水量、風速、気温、日照時間) 以上の観測が行われていて、欠測データがない27観測地点から得た。また、降水量を算出した時と同様に各点について最近隣の気象観測所のデータを用いた。図4には推定例として、Thornthwaite法か

ら得られた1989年における年蒸発散量の分布を示す。

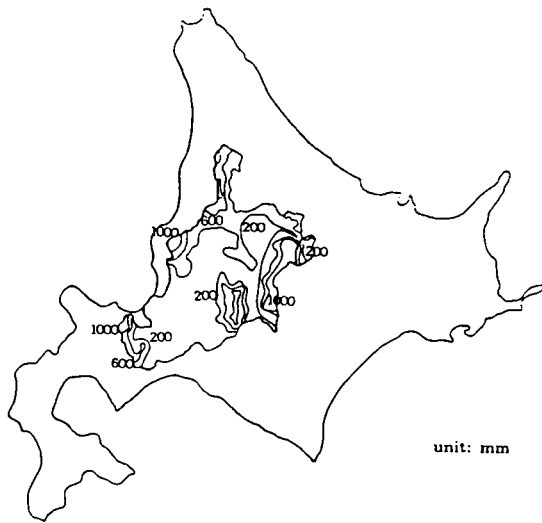


図3 年最大積雪水量の推定例(1989)

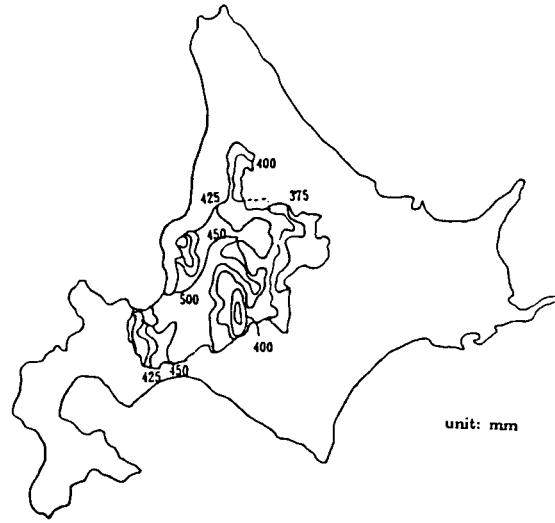


図4 年蒸発散量の推定例(1989)

(4) 水収支の評価

先に示した長期の水収支をあらわす式(式(1))にしたがい石狩川流域における年間水収支を検証する。ただし、流域貯留量の変化 ΔS は不明であるので、ここでは定常状態を仮定し、有効降水量(降雨+積雪-蒸発散)=流出という観点から評価することとした。なお、検証に用いた流出量は石狩大橋基準点の自然流量を用いた。検証結果を表2に示す。

これから、石狩川流域で推定された値は、実際の流出高より最大で20%過小評価するような結果となっている。これを改善するには、各項目(積雪水量、降雨量、蒸発散量、観測流量)の精度向上が必要と考えられるが、とくに、蒸発散量の推定法と流域貯留量の考え方が今後の課題である。

(5) 地球温暖化による水文量の変化

二酸化炭素が現状の2倍となった時の、現状からの気温の増分を図5に示す。これから、気温は夏期にはほとんど差がないが、冬期(11月~3月)の上昇が顕著である。また、1987年、1989年、1992年について、現状と二酸化炭素の倍増時の年降水量を比較した結果を表3に示す。これから、 $2 \times CO_2$ では $1 \times CO_2$ に比べ、6~15%の年降水量の増加が見られ、とくに、降雨量成分は、気温の上昇にともなう雪の雨への転換により、29~42%もの増加が見られる。

表2 石狩川流域(石狩大橋)の年間水収支

年	1987	1989	1992
降雨量(mm)	779	1,015	1,101
積雪水量(mm)	554	588	379
蒸発散量(mm)	439	492	396
推定流出高(mm)	894	1,111	1,084
観測流出高(mm)	1,128	1,143	1,296
誤差(推定/観測*100)%	79	97	84

蒸発散量はThornthwaite法で推算

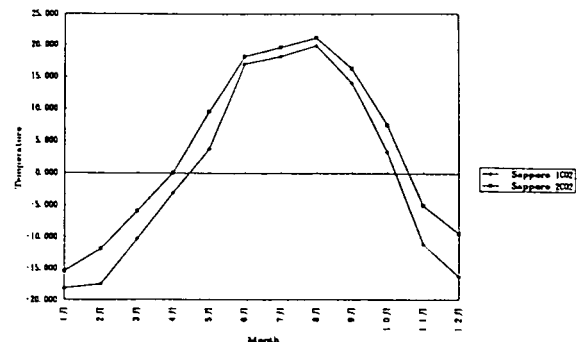


図5 1×CO₂と2×CO₂の気温の比較

2×CO₂時の年最大積雪水量は、先に示したように1×CO₂と2×CO₂の降雪量の比率を求め、現状の積雪水量にそれに乗じることで得られるとした。この時、各年の比率は、1987年に0.54、1989年に0.41、1992年に0.38となる。すなわち、これは各年とも積雪水量は現状の半分から4割近くまで減少することを意味する。これによって得られた年最大積雪水量の結果を表3に示す。

次に流域内の各アメダス観測点で2×CO₂時の気温変化から、融雪開始日を求めた。また、Degree-Day法で融雪を計算し、先に求めた積雪水量を越えた日を融雪終了日とする。これらの現況との比較については表3に示す。これらの結果から、2×CO₂の場合、融雪開始日は、約2ヶ月早まり、融雪終了日は、約2～3ヶ月早まることになる。

年蒸発散量については、1987年、1989年、1992年を対象に、現状と二酸化炭素の倍増時の場合をThornthwaite式によって算出した結果を表3に示す。これから、2×CO₂では1×CO₂に比べ、気温の上昇にともない、13～33%の年蒸発散量の増加が見られる。

表3 温暖化時の水水量変化

年	1987			1989			1992		
	1×CO ₂	2×CO ₂	増減 (%)	1×CO ₂	2×CO ₂	増減 (%)	1×CO ₂	2×CO ₂	増減 (%)
降水量(mm)	1,274	1,374	7.8	1,352	1,558	15.2	1,484	1,569	5.7
降雨量(mm)	779	1,109	42.4	1,015	1,419	39.8	1,101	1,425	29.4
積雪水量(mm)	554	325	-41.3	588	257	-56.3	379	168	-55.7
融雪開始日	3.13-4.6	1.13-2.21	-	3.1-3.19	1.1-1.29	-	3.8-4.4	1.4-2.8	-
融雪終了日	4.24-5.24	2.4-3.6	-	4.19-5.8	1.20-3.2	-	4.21-5.18	1.16-3.2	-
蒸発散量(mm)	439	526	19.8	492	554	12.6	396	527	33.1
流出高(mm)	894	908	1.6	1,111	1,122	1.0	1,084	1,066	-1.7

以上の結果として、石狩川の年間の総流出量推定値(=年降雨量+年最大積雪水量-年蒸発散量)を表3に示す。年総流出量の変化ではさほど変化は見られないが、雨と雪の配分変化にともない、季節毎の流出パターンは、温暖化時に大きく様相を変えらると思われる。

5. まとめ

積雪寒冷地における広域の流域での水循環については、これまで未着手の課題であったが、地球環境問題を考える上で今後検討すべき問題である。本試験研究の中では積雪寒冷地流域の水循環過程として、降水、積雪、蒸発散の現況について推算をおこなった。また、地球温暖化のシナリオのもとでそれらがどのように変化するかを試算した。ここでの検討対象は、流域面積が14,330km²である石狩川流域とした。

降水量については、流域内気象データから推算したが、観測点の少ない山地部については、標高による補正をおこない、算出した。積雪水量については、人工衛星(空中写真、LANDSAT, MOS-1, NOAA)画像から雪線を捉え、雪線上の点に積算暖度法をあてはめて推定した。なお、積雪水量の推定手法については、定山溪ダム流域(104km²)、豊平川流域(雁来地点, 650.6km²)における検証をおこなったうえで石狩川流域(石狩大橋地点, 12,696.7km²)に適用した。蒸発散量については、流域内気象データからThornthwaite法、amon法およびPenman法といった推定式によって推

算した。これらによって推定した有効降水量と河川からの流出量を比較し、水循環過程を水収支的に検証した。

次に、気象研究所の大気大循環モデル（MRIGCM）をもとに、土木研究所とカリフォルニア大学で構築されたメソスケールモデルで計算された地球温暖化のシナリオ（二酸化炭素が現状の2倍となった場合）を入手した。それによって、積雪寒冷地流域の水循環がどのように変化するか推算した。本シナリオによれば、北にいくほど温暖化にともなう気温の上昇量は大きくなり、それともない降積雪量の減少と融雪期の早まりが顕著となるような結果が得られた。

以上のような積雪寒冷地流域の水循環の現状分析と地球温暖化による変化を踏まえ、今後の河川・ダム計画、管理を考える上での基礎資料を得ることができた。

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) 1987年、1989年、1992年の3ヶ年について推定された石狩川流域の降雨量は、780～1,100mmとなった。この時、降雨量については、アメダス、気象官署のデータに基づき、標高による補正をおこなった。
- (2) 航空写真、人工衛星（LANDSAT, MOS-1, NOAA）画像を利用し、定山溪ダム流域（104km²）、豊平川流域（雁来地点、650.4km²）、石狩川流域（石狩大橋地点、12,696.7km²）の積雪水量を求めた。
- (3) 石狩川流域の積雪水量は、NOAAの画像情報を用いて1987年、1989年、1992年について推定した結果、380～590mmという推定結果が得られた。
- (4) 1987年、1989年、1992年の3ヶ年について推定された石狩川流域の蒸発散量は、400～560mmの範囲となった。この時、用いた手法はThornthwaite法、Hamon法、Penman法である。
- (5) 以上の結果に基づき、石狩川（石狩大橋基準点）の流出量との比較によって水収支を検証したところ、降雨量＋積雪水量－蒸発散量（Thornthwaite式を使用）は流出高に対し、1987年は79%、1989年は97%、1992年は84%となった。
- (6) 気象研究所大気大循環モデル（MRIGCM）をもとに、土木研究所とカリフォルニア大学で構築されたメソスケールモデルの結果を整理した。この中では、1×CO₂と2×CO₂の気温、降水量、風速、相対湿度の変化を整理した。
- (7) 1987年、1989年、1992年の3ヶ年について、1×CO₂と2×CO₂の降水量を比較すると、後者の場合は前者に対し6～15%増加するような結果となる。ただし、降雨量は、気温の上昇にともなう降雪からの転換で、現状に対し29～42%の増加がみられる。

(8)1987年, 1989年, 1992年の3ヶ年について, $1 \times \text{CO}_2$ と $2 \times \text{CO}_2$ の蒸発散量を比較すると, 気温の上昇にともない, 後者は前者に対し, 13~33%増加するような結果となった。

(9)1987年, 1989年, 1992年の3ヶ年について, $1 \times \text{CO}_2$ と $2 \times \text{CO}_2$ の積雪水量を比較すると, 前者の380~590mmに対し, 後者の170~330mmと41~56%の減少がみられる。これは先述したように降雪が降雨に変換することに起因する。

(10)1987年, 1989年, 1992年の3ヶ年について, $1 \times \text{CO}_2$ と $2 \times \text{CO}_2$ の融雪パターンを比較すると, 後者は前者に比べ, 融雪開始日で約2ヶ月, 融雪終了日で2~3ヶ月早まる。

北海道のような積雪寒冷地では, 融雪の貯留による水資源管理が重要であるが, 以上見てきたような温暖化による影響で, その変更を余儀なくされる。また, 冬期間の降雨により, これまで心配する必要のなかった洪水対策が必要になるかもしれない。さらに, 当然のこととして, 水量の変化とともに水温や水質の変化で河川や湖沼の生態系に影響が及ぶことが懸念される。

7. 参考文献

- 1)中津川誠, 山口昌志, 瀬戸島政博, 虫明成生, 1995: 石狩川流域における水収支の検討に向けて, 水文・水資源学会1995年研究発表会要旨集, 240-241.
- 2)中津川誠, 1995: 北海道の水文, 1995年度(第31回)水工学に関する夏期研修会講義集, Aコース, A-1-1-A-1-17.
- 3)中津川誠, 1995: 積雪寒冷地の水文現象のモデル化と環境変化がそれらに与える影響に関する研究, 開発土木研究所報告, 106, 5-22.
- 4)日比野忠史, 1995: 山地流域における降雨の特性に関する研究, 中央大学博士論文, 21-44.
- 5)武田要, 高橋裕, 1981: LANDSAT雪線情報と積算暖度法による流域最大積雪水量算定に関する研究, 土木学会論文報告集, 311, 81-92.
- 6)風間聡, 沢本正樹, 1994: 積雪のある流域における水収支について, 水工学論文集, 38, 113-118.
- 7)Nakatsugawa, M and T. Koike, 1993: Snow Hydrology, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, No. SI-3, Hydrology, 101-111.