

1. 北海道における冬期温暖化の傾向と水循環へ与える影響

WINTER WARMING TRENDS AND THEIR EFFECTS

ON THE HYDROLOGIC CYCLE IN HOKKAIDO

白谷 友秀*・中津川 誠**

Tomohide USUTANI, Makoto NAKATSUGAWA

ABSTRACT ; We chronologically summarized Hokkaido's winter meteorological conditions and examined warming trends and climatic disturbance trends, based on meteorological records. It was found that temperatures in Hokkaido in recent years have been higher than the average of past years (1961–1970), and the increase in minimum temperature has been greater than the increase in maximum temperature. Summary and categorization of meteorological charts on heavy rain and snowfall events in winter also confirmed a decrease in the number of such weather events that were caused by winter pressure patterns and an increase in such weather events caused by low pressure. Furthermore, a trial calculation of the degree of effect of increased temperature on runoff in this cold, snowy region indicated that runoff in seasons of snow cover (snow accumulation season and snow melting season) is more strongly influenced by increased temperature than is the runoff in summer.

KEYWORDS ; snowy cold regions, winter, global warming, simulation, hydrologic cycle

1 はじめに

北海道を流れる石狩川では融雪期の流出量は年間総量の約 1/3 を占め、この融雪水が、積雪寒冷地における重要な水資源となっている。融雪期の流出状況は気象の影響を強く受け、温暖化を考えたとき融雪水の減少が懸念される。そこで、本研究では気象資料などから冬期の気象状況を経年的にまとめ、北海道における温暖化の傾向を探った。この中で、冬期の大雨・大雪事例をもとに、発生頻度や気象擾乱の長期的な動向についても考察した。さらに、モデル計算を行い、積雪寒冷地河川の流出に与える気温上昇の影響を試算した。

道内の冬期の平均気温は、1961 年～1970 年の平均値（以下、過去統計値と呼ぶ）を基準としたとき、1998 年以降は過去統計値に近い値で経過していたものの、1989 年から 1997 年では 9 年間にわたり 0.5°C ～ 2.5°C といった高い気温で推移していた。そこで、気温上昇を反映する現象として冬期の大雨に着目したところ、その発生回数は 1987 年以降増加しており、温暖化を示唆する結果であった。また、冬期に発生した気象擾乱の気圧配置を分類集計したところ、冬型の気圧配置の出現数が減少し、一方、低気圧によるものが増加しており、南の暖かい空気が低気圧によって北海道に運ばれることが多くなっていることを示す結果となった。そこで気温の上昇がどれだけ融雪期の流出に影響を与えるのかを、石狩川流域を対象としてモデル計算により調べた。その結果、 5.8°C の気温上昇では約 25% の流出量の減少、1 ヶ月程度の融雪期の早まりが試算された。さらに、温暖化の影響は、夏期の流出よりも積雪期や融雪期といった雪に関連した時期の流出に与える影響が大きいことが計算の結果からわかった。

2 気象水文データから見た温暖化の傾向

2.1 気温の長期的傾向

最初に気温の動向について、気象資料の整理を通し調べてみる。ここでは、日平均気温、日最低気温、日最高

* (財) 日本気象協会 Japan Weather Association, N4W23, Chuo-ku, Sapporo, Japan

** 北海道開発局 豊平川ダム統合管理事務所 Hokkaido Regional Development Bureau, Toyohira River Integrated Dam Group Management Office, S32W8, Minami-ku, Sapporo, Japan

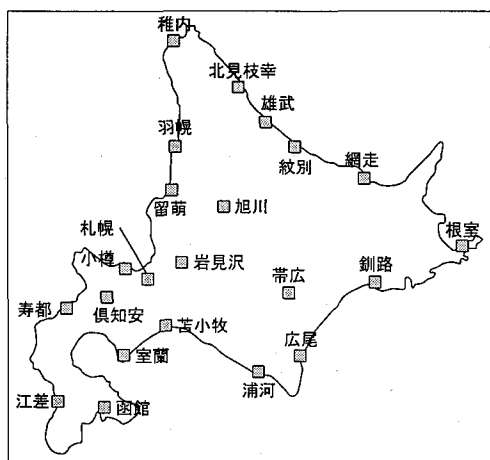


図-1 北海道の気象官署位置図

気温について、年間を通した平均値と冬期に限定した平均値について長期的な傾向を見ることにした。なお、冬期は、12月から翌年3月とした。用いた観測データは、1961年から2003年までの道内22箇所の気象官署のデータとした（図-1 参照）。道内全体の状況を見る前に、札幌管区気象台を取り上げ、年平均気温と日最高気温及び日最低気温の年平均の様子を図-2 でみる。これによると、札幌管区気象台の年平均気温と日最低気温には上昇傾向が見られるが、日最高気温には顕著な上昇が見られない点が注目できる。つまり、気温の上昇は、最高気温が大きく上昇したのではなく、最低気温が下がらなかったことが大きく関与していたことを示している。そこで、同様な傾向が他の気象官署においてもあるかを調べる。図-3 は、年平均気温、日最高気温、および日最低気温の過去統計値（1961年から1970年にわたって平均した値）と、近10ヵ年（1994年から2003年）の平均値との差を地点毎に整理したものである。図には全観測所の平均値も示した（図中★印）。これによると、札幌管区気象台ほど顕著ではないものの、道内22箇所の内17箇所で最高気温の上昇量よりも最低気温の上昇量が大きかった。

以上の結果より、最近の道内における気温は過去統計値に比べ高く、最高気温の上昇より最低気温の上昇が大きいたことが認められた。

次に、冬期の気温の変化を見ていく。図-4 は、道内気象官署の冬期気温を経年的に示したものである。図では、観測所毎の観測値を過去統計値からの偏差で表し、この偏差より全気象官署の平均値を求めプロットしている。なお、この図では冬期を12月から翌年3月としており、例えば1961年の点は、1961年12月から1962年3月の平均値である。図によると、一部気温が低く経過した年（1998年から2001年）もあるが、全体的な傾向としては上昇しているように見える。また、1989年から1997

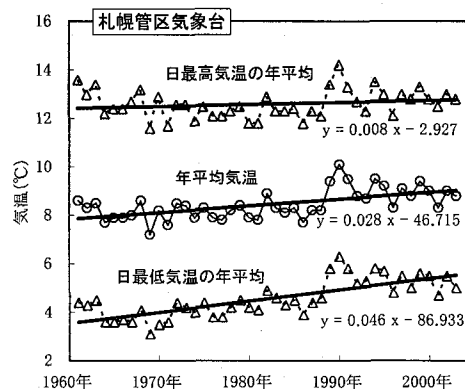


図-2 札幌管区気象台における気温の推移

図中には、気温の傾向を表す1次回帰式を示した。

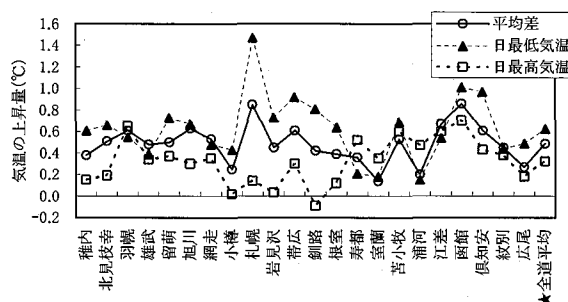


図-3 道内気象官署の気温の上昇量

1961年から1970年の平均と1994年から2003年の差を示した。図には道内全官署の平均値（★印）も示した。

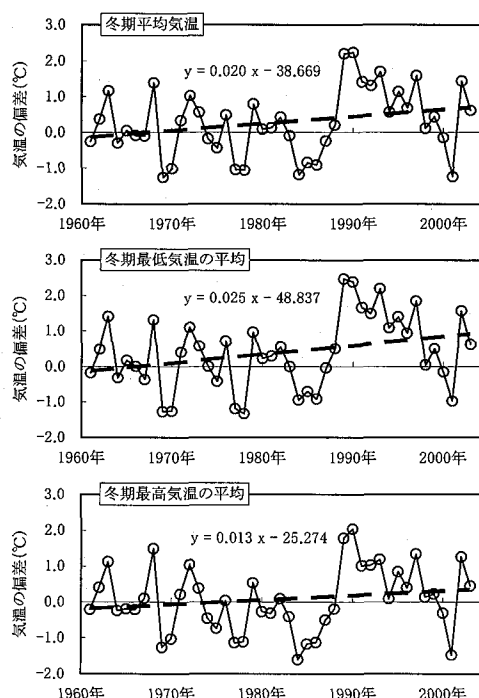


図-4 道内気象官署の冬期気温の長期的変化

1961年から1970年の平均を基準として、その値からの偏差で示した。上段は平均気温、中段は日最低気温の平均、下段は日最高気温の平均である。

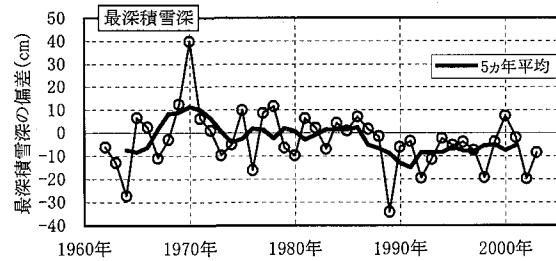
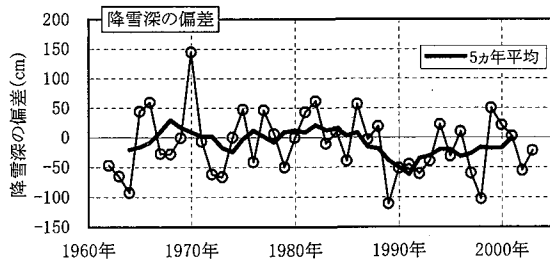


図-5 道内気象官署における降雪深と積雪深の長期的変化

左図は降雪深の偏差、右図は最深積雪深の偏差を表す。

年までの9回の冬期は、気温の偏差が約1.5℃高い状況が続いていた。さらに、冬期の気温に関しても、最高気温の上昇よりも、最低気温の上昇が大きいことが認められた。

2.2 雪、及び流量に関する長期的傾向

ここまでは、気温を中心として長期的傾向を調べてきたが、ここでは気温と対応しつつ雪に関する様子を調べる。温暖化が進むことによって、元々降雪であったものが降雨に代わったり、積雪深の減少が考えられるため、降雪深と最深積雪深に注目する。図-5は、降雪深と年最深積雪深の長期的変化を示したものである。図にプロットした点は、

前述の気温と同様に過去統計値を基準として、この値からの偏差を道内の気象官署で平均化した値である。図によると、降雪深・積雪深とも明瞭ではないものの、やや減少しているように見える。また、1989年は降雪深の偏差は100cmまで減少し、年最深積雪深に関しても30cmまで減少しており、気温の上昇と対応するような変化が見られた。このような降雪深や年最深積雪深の減少によって、融雪水が減少し、結果的に河川の流量が減少することが考えられる。図-6は石狩川(図-10参照)の融雪期の流量(4月から6月の平均流量)を示したものであるが、1989年冬期における雪の減少に対応するように、1990年の流量が少なくなっている。しかし、全体的な傾向としては、流量は600~900m³/sの範囲を変動し、減少や増加といった長期的な傾向を示すことはなかった。

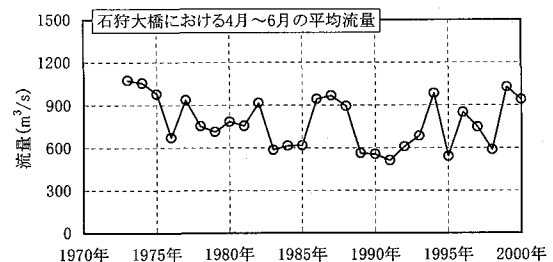


図-6 石狩川(石狩大橋)における融雪期の流量の変化

ここで示した年は、気温と雪のグラフで示した年と1年異なる。このため、降雪が少なかった1989年冬期は、この図の1990年の流量に対応する。

表-1 事例を抽出する条件

項目	対象月	事例抽出の条件
大雪	12月~2月	日平均気温が0℃未満、かつ、日降水量が30mm以上
冬期的大雨	12月~2月	日平均気温が0℃以上、かつ、日降水量が30mm以上の日

3 天気図から見た気象擾乱の長期的傾向

前章では、気象データをもとに長期的な傾向を見てきた。ここでは、大雪と冬期的大雨に着目し、冬期の気圧配置の長期的な変遷を調べる。具体的には、表-1に示す条件に従って大雪と冬期大雨事例を抽出し、これらの事例の天気図を典型的なパターンに分類し、その変遷を見ていく。解析の対象とした月は12月から翌年2月とした。

天気図パターンの分類は表-2に従った。大雪をもたらす原因となる擾乱を大別すると、低気圧通過、冬型季節風、西岸小低気圧、前線停滞の4種類に分けることができ、この4種類を基本として、地上天気図をさ

表-2 天気図パターンの分類

大分類	小分類	判別条件の説明
低気圧	Lj	低気圧が日本海を北東進し、サハリン付近に達する
	Ln	低気圧が宗谷海峡を東進する
	Ls	低気圧が北海道の南岸(三陸沖)を北東進する
	Le	低気圧が道東を北上する
	Lt	低気圧が東北地方を横断する
	Lp	低気圧が本州の東海上を北東進する
	Ld	二つ玉低気圧に挟まれる
	L	低気圧が直撃する
冬型	Mo	冬型季節風(低気圧がオホーツク海:知床半島以西に位置する)
	Mk	冬型季節風(低気圧が千島列島~カムチャツカ半島に位置する)
小低気圧	S1	西岸小低気圧(低気圧が羽幌沖:雄冬岬以北に位置する)
	S2	西岸小低気圧(低気圧が石狩湾:積丹半島以北に位置する)
	S3	西岸小低気圧(低気圧が檜山沖:積丹半島以南に位置する)
	S4	小低気圧(低気圧が日本海に位置する)
前線	F	前線が停滞する

らに細かく分類し、表-2 に記す 15 種類に分けることにした。

3.1 大雪をもたらした天気図パターンの変化

まず、上述の手順で 1961 年から 2003 年の冬期に発生した大雪を集計してみた。この場合、大雪の発生回数は 126 回あり、平均すると 1 年間に 2.9 回発生したことになる。図-7 には、天気図パターン別に大雪の発生頻度を集計したものを示す。なお、図では 1 年当たりの発生回数に基準化して示してある。この図で注目できるのは、年代 1（1961-1968）と年代 2（1969-1977）での大雪発生回数が 3.5 程度であったのに対し、年代 3（1978-1986）以降の発生回数は 2.0～2.5 回程度と減少している点、また、天気図パターンに関しては冬型の気圧配置による大雪（Mo、Mk）が減少している点である。年代 3 以降については、低気圧による事例が増加していることも特徴として読み取れる。この結果は、大雪をもたらす発生要因が近年変わってきたことをうかがわせるものである。

3.2 冬期に大雨をもたらした天気図パターンの変化

前節では大雪に着目し天気図パターンを整理したが、ここでは冬期に発生した大雨について、その天気図パターンを調べる。

1961 年から 2003 年の冬期に大雨が発生した回数は 72 回であり、1 年あたり平均 1.6 回発生していた。前節と同様に、天気図パターン別に大雨の発生頻度を集計したものを図-8 に示す。この図においても 1 年当たりの発生回数で基準化して示してある。冬期に大雨が発生した回数は、年代別に増減が見られ、発生回数の増加や減少といった顕著な傾向はみられないが、年代 1（1961-1968）と年代 2（1969-1977）の発生回数が 1.5 回程度であるのに対し、年代 4 以降は概ね 2.0 回であり、年代 4 以降、冬期の大雨が増えたことを示す結果となっている。

大雨時の天気図パターンの出現状況は、低気圧が北海道を直撃する場合（L）はどの年代にも定常的に出現し頻度も多く、次いで低気圧が北海道の北方や南岸を通過する場合（Ls や Ld）である。また、年代 3 以降、低気圧が日本海を北東進（Lj）するパターンが多くなっている。低気圧が北海道を直撃したり、北海道の南岸や日本海を北東進する場合はいずれも暖気を伴って低気圧が北上してくるため気温が上がり、冬期でも湿った雪や雨を降らせる場合が多いものと考えられる。このようなことも一つの理由として、年代 4 の L と Ls の両パターンの発生回数が他の年より多いといった特徴と、この年代の高温（前章の気温に関する分析結果、図-4 参照）が対応したと考えられる。これらの結果は、南の暖かい空気が低気圧によって北海道に運ばれることが多くなっていることをうかがわせるものである。

このように冬期の大雨は、暖気を伴うことから融雪洪水を引き起こす可能性があり、防災上その発生頻度の増加は関心事の一つと思われる。ここでは、気象官署では抽出できなかった大雨事例を、見逃さずに抽出する目的から、気象官署に比べ観測期間は短い、より密な観測データが得られるアメダス（160 箇所）のデータによって発生回数を集計してみた（図-9）。図-8 では年代 4 から年代 5 にかけて発生回数が減少しているように見えたが、

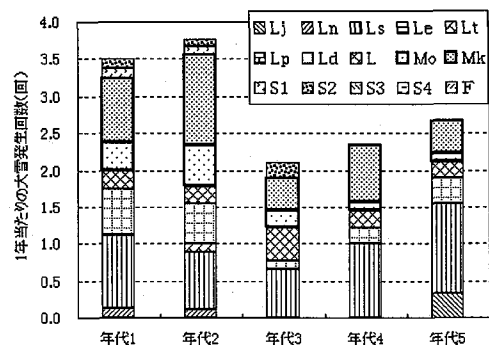


図-7 天気図パターン別大雪発生頻度

年代 1 は 1961～1968 年、年代 2 は 1969～1977 年、年代 3 は 1978～1986 年、年代 4 は 1987～1995 年、年代 5 は 1996～2003 年を表す。

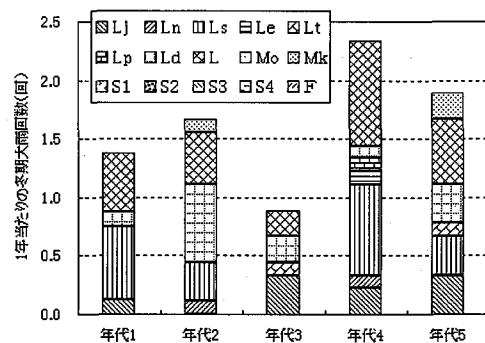


図-8 天気図パターン別冬期大雨発生頻度

年代分けは、図-7 と同じである。

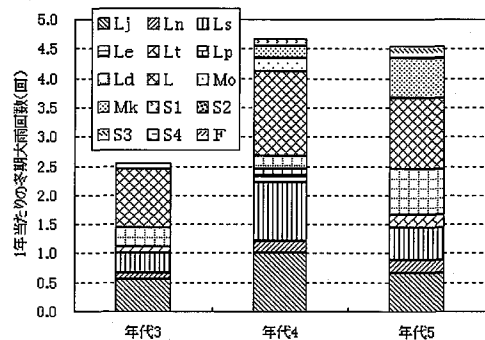


図-9 天気図パターン別冬期大雨発生頻度（アメダス）

年代分けは、図-7 と同じである。

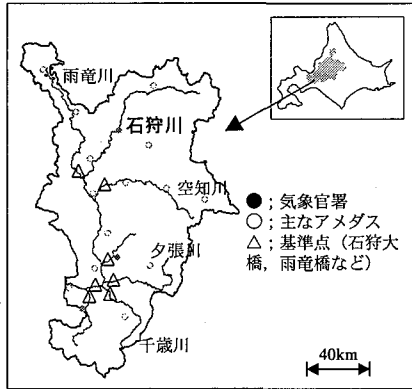


図-10 対象流域（石狩川）

密な観測データを用いた図-9 では発生回数は同程度であり、冬期の大雨発生回数が年代 4 以降増加したことが明らかとなった。

4 温暖化による積雪寒冷地河川への影響の試算

ここまでは、観測データや天気図をもとに、それらの長期的な傾向について整理してきた。その結果、気温の上昇傾向やこれに対応した形での積雪の減少が認められた。そこで本章では、気温の上昇がどれだけ融雪期の流出量に影響を与えるかを、石狩川流域を対象としてモデル計算によって調べる。

対象とした石狩川は、北海道の中央部の大雪山系石狩岳（標高 1,967m）に源を発し、雨竜川、空知川などの主要支川を含む大小約 70 の河川と合流しながら石狩平野を流下し日本海に注ぐ（図-10 参照）。流路長は 268km（全国第 3 位）、流域面積 14,330km²（全国第 2 位）であり、全国有数の規模を誇る河川である。流域の地形は標高 1,000m 以上の山岳が石狩平野を囲み、平野の標高は 50m 以下と低くなっている。

モデル計算では、3 種類の気温を想定し、それぞれの条件で流出量を計算し、その結果を比較する。計算に用いた手法は、気象条件から蒸発散や積雪、また流出量といった水文諸量を包括的に推算できるものを用いた¹⁾。なお、用いたモデルの再現性について

では、既報¹⁾において確認されている。想定した気温は、IPCC 第三次評価報告書²⁾を参考に決めた。同報告書では、複数のモデルで予測した結果、気温の上昇量として、2050 年で 0.7～2.6℃、2100 年では 1.3～5.8℃を報告している。本計算では、最も高く予測されている気温を用いることにし、①2000 年の観測値をそのまま使用した場合、②2000 年に観測された気温に 2.6℃を加算した場合（2050 年を想定）、③観測気温に 5.8℃を加算した場合（2100 年を想定）の 3 種類について計算を行うものとする。なお、気温の上昇に起因して植生分布の変化などが考えられるが、変化を予測することが困難であることから、本解析では気温のみを変えることにする。

図-11 は、モデルによって推算した年間水収支の変化を示したものである。これによると、気温の上昇に伴い蒸発散量が増え、河川の流出量が減少している。流出量の減少の割合は、2000 年の流出量と比べると、2050 年は 4%の減少、2100 年では 10%の減少となっている。年間を通した流出量を図-12 に、また月別平均流量を表-3 に示すが、融雪期（ここでは 3 月から 6 月とした）の平均流量を比較すると、2000 年の流量 1,130m³/s に対し、2050

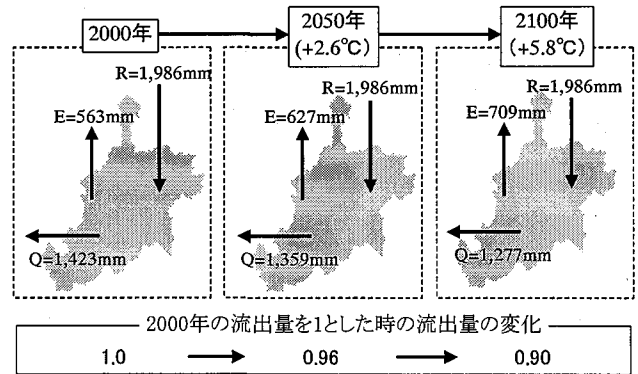


図-11 流域の年間水収支の変化

R は降水量、E は蒸発散量、Q は流出高を表す。

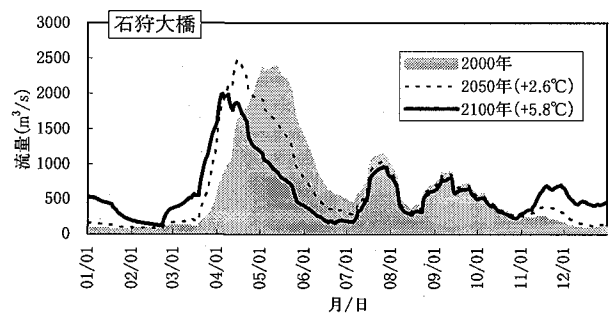


図-12 気温の上昇による流出量の変化

図は、前後 5 日の平均値で示した。

表-3 推算された月別平均流量

月	2000年	2050年 (+2.6℃)	増加率	2100年 (+5.8℃)	増加率
	流量 (m³/s)	流量 (m³/s)		流量 (m³/s)	
1月	80	122	1.53	371	4.64
2月	80	84	1.05	136	1.70
3月	163	313	1.92	714	4.38
4月	1428	2145	1.50	1666	1.17
5月	2186	1421	0.65	747	0.34
6月	743	435	0.59	222	0.30
7月	898	751	0.84	640	0.71
8月	424	369	0.87	321	0.76
9月	815	771	0.95	700	0.86
10月	387	366	0.95	329	0.85
11月	226	337	1.49	527	2.33
12月	93	141	1.52	431	4.63
平均	627	605	0.96	567	0.90

※増加率：各月の流量を2000年の流量で割った値。

年は5%の減少(1,079m³/s)、2100年は26%の減少(837m³/s)となった。2000年と比較したときの2100年の流出量は、通年で10%の減少に対し、融雪期は26%の減少となっており、温暖化の影響は、融雪期の流出に大きく現れている。積雪寒冷地の河川では融雪水が重要な水資源となっているが、モデル計算の結果によると、温暖化は融雪期の水資源に大きな影響を与えることを示唆するものであった。図-13は、2000年、2050年(+2.6℃)、2100年(+5.8℃)の同日(4月15日)の積雪分布を推算したものである。2000年では平野部で無積雪域(灰色の箇所)が見られるものの、流域の大半は雪が残っている。しかし、2100年では流域内のほとんどで積雪がなく、すでに融雪の最盛期を過ぎている。このように、気温の上昇は、積雪状態(積雪量や融雪時期など)を変化させ、結果的に融雪期の流出に大きく影響を与えるものと考えられる。

また、年間を通した流出状況の違いを図-12でみると、7月から10月までの流出状況には大きな違いはないが、1月から6月と11月から12月の積雪期間の流出状況に大きな差が現れている。違いの一つは、融雪期の流出ピークが早まる点である。融雪期の流出のピークは、2000年で5月中旬、2050年は4月中旬、2100年では4月上旬と推算されており、融雪の時期が約1ヶ月早まる推算結果となった。もう一つの違いは、気温が高くなるにつれ11月から12月の期間の流出量が大きくなる点である。2000年では流出量が減少する期間であるが2100年の流量では11月下旬から12月上旬にかけて一つの極大を示しており、初冬の融雪洪水の発生が懸念される。

5 おわりに

北海道を対象として、観測資料から冬期の気象状況を経年的にまとめ、温暖化の傾向や、気象擾乱の長期的な動向について考察した。また、モデル計算を行い、気温上昇が与える積雪寒冷地の流出への影響を試算した。結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 最近の道内における気温は過去(1961年から1970年)の平均に比べ高く、気温の上昇は、最高気温が高くなるよりも最低気温の上昇が大きいことが認められた。
- 2) 降雪深・積雪深の長期的傾向には、明瞭ではないものの、やや減少していた。気温が高かった1989年では、気温の上昇に対応するように降雪深・積雪深の減少が見られた。
- 3) 冬期に発生した大雪・冬期の大雨事例の気圧配置を分類集計したところ、冬型の気圧配置の出現数が減少し、低気圧によるケースが増加していた。
- 4) 石狩川を対象として、気温の上昇に伴い流出量がどのように変化するかをモデル計算により推算した。その結果、気温が5.8℃上昇した場合、年間の流出量は10%の減少、一方、融雪期(4月から6月)では26%の減少と推算された。温暖化の影響は、夏期の流出よりも積雪期や融雪期といった雪に関連する時期の流出に大きく現れる結果となった。

なお、本論文は、(独)北海道開発土木研究所 環境水工部 環境研究室において行った研究成果の一部である。また、本研究の一部は、北海道開発局受託研究費によって実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 臼谷友秀, 中津川誠, 工藤啓介: 石狩川全流域を対象とした水循環の定量化, 平成16年度土木学会北海道支部論文報告集(CD-ROM), 第61号, 2005。
- 2) 気象庁ホームページ: http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/spm.htm

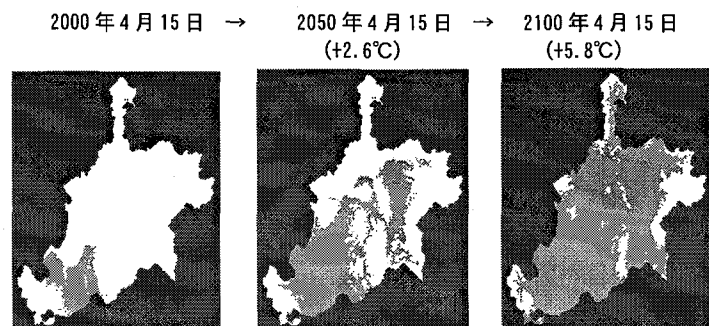


図-13 温暖化に伴う積雪分布の変化

図は、左から2000年、2050年(+2.6℃)、2100年(+5.8℃)の4月15日の積雪分布図である。白い範囲は積雪域、灰色の部分は積雪のない領域を表す。