

気候変動が石狩川流域の水循環と水利用へ与える影響について

Effects of Climate Change on Hydrologic Process and Water Use in the Ishikari River Catchment Area

室蘭工業大学
室蘭工業大学
(財)日本気象協会 北海道支社

○学生員 川村 一人 (Kazuto Kawamura)
正員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
正員 白谷 友秀 (Tomohide Usutani)

1. はじめに

北海道，東北，北陸などの積雪地域では，雪は貴重な水資源であり，灌漑用水や生活用水，発電用水等の重要な供給源になっている．気候変動による気温上昇を考えたとき積雪の減少，融雪期の早期化や融雪水の減少が予想され，水利用に影響を与えると懸念されている．

川村ら¹⁾によると，石狩川流域を対象として2100年に4.4℃の気温上昇を仮定した場合，融雪期(4~6月)の流出量の減少が顕著で，23%の減少が起こり，融雪のピークが1カ月ほど早くなると述べている．ただし，気候変動による水資源への影響をより地域的に評価するには気温上昇だけでは不十分で，降水量の変化や降雪の減少，さらに気象要素の空間分布を考慮する必要がある．

そこで本報告では，気象庁・気象研究所から提供された地域気候モデルMRI-RCM20(以降RCM20)の再現結果(1981~2000年)，近未来予測値(2031~2050年)，21世紀末予測値(2081~2100年)を用いて，石狩川流域を対象に，50年後，100年後の水循環の変化を試算し，流出状況の変化が流域内の水利用に与える影響を考察した．

2. 対象流域，及び基礎資料

解析対象は，図-1に示す石狩川流域である．石狩川は，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．流路長は268km(全国第3位)，流域面積14,327km²(全国第2位)であり，全国有数の規模を誇る河川である．

解析に用いた資料を表-1に示す．気象に関しては，気温と降水量は気象庁の地域気候モデルRCM20の実験結果(1981~2000年，2031~2050年，2081~2100年)を用い，その他の項目は気象官署及びアメダスのデータを

基本として1998年の日単位データを利用した．地形に関する資料は，主に石狩川流域ランドスケープ情報²⁾を用いた．

3. 水循環の計算手法

流域内の水循環は白谷ら³⁾による大規模流域での水文諸量の定量化手法を利用して求めた．計算手法の概要を図-2に示す．計算は1kmメッシュ単位で行う．まず，降雨量，融雪量，蒸発散量を水・熱収支計算から求める．同時に積雪深，積雪密度も計算する．最後に，降雨量，融雪量，蒸発散量より流出量を求めていく．以下に手法の概略を示す．

3.1 水・熱収支モデルによる融雪，蒸発散の計算

流域内の流出量を計算するためには降雨，融雪，蒸発散を求める必要がある．降雨量は降水量より雨と雪に判別して求める．一方，降雪と判断された場合は積雪として蓄積される．この際の積雪深と積雪密度は本山ら⁴⁾の粘性圧縮理論より求める．次に融雪量と蒸発散量は近藤ら⁵⁾によって提案されている2層モデルに基づく熱収支法により求める．熱収支は大気-植被(キャノピー)-地表間の熱フラックスを定式化することで計算される．

融雪量 $M(\text{mm/d})$ は積雪への熱供給量を融雪熱量 $Q_M(\text{W/m}^2)$ とし，次式の通り求める．

表-1 解析資料

項目	種別	
気象	気温	気象官署, アメダス, RCM20
	降水量	
	湿度	
	日射量	
	日照時間	
	降雪深	
地形	風速	気象官署, アメダス, 気象庁RSM
	標高	
	地標	
	メッシュ間の流入流出関	
	傾斜	



図-1 石狩川流域

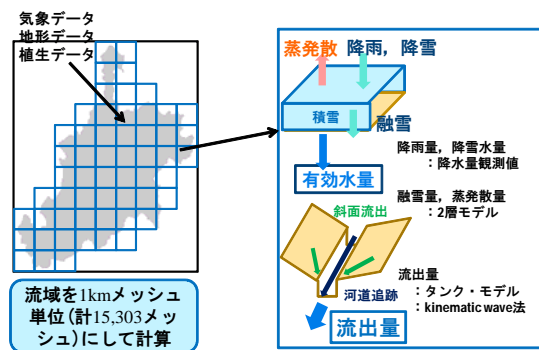


図-2 計算手法の概要

$$M = 86,400Q_M / \ell_f \quad (1)$$

ℓ_f は氷の融解潜熱(=0.334×10⁶J/kg)である。

蒸発散量 E (mm/d)は2層モデルで求めた潜熱フラックスを蒸発潜熱($=2.50 \times 10^6$ J/kg)で除して求めた。

3.2 流出量の計算

流出量の計算は、入力値となる降雨量、融雪量、蒸発散量に対応させて、メッシュ単位で行う。一つのメッシュでは、上流側のメッシュからの流量を河道追跡し、また、メッシュ内で生じる流出を計算し、これらの合計をメッシュの流出量とした。河道追跡には、kinematic wave式を変形した次の式を用いた。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{5 i^{0.3} Q^{0.4}}{3 n^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 Q は流量(m³/s)、 i は疑似河道の勾配、 n はマンニングの粗度係数、 B は川幅(m)を表す。

メッシュ内での流出計算には、3段タンクモデルを用いた。モデルパラメータは、石狩川流域内のダムで同定したパラメータ⁶⁾を基に、微修正を加えた値を全流域一律で計算を行った。

4. メッシュデータの作成

実測値の再現計算に用いる気象要素のメッシュデータは、Kriging法による補間手法など(白谷ら³⁾)で作成した。補間手法の内訳を表-2に示す。

一方、将来予測計算では、気温と降水量にはRCM20の結果を用いた。この際、気温と降水量が水循環を支配する要因として着目し、その他の気象要素は両者に比べて感度が小さいとして、1998年の観測値から作成したデータを用いた。以下にRCM20の概要と補正手法を示す。

4.1 RCM20の概要

RCM20は気象庁・気象研究所によりシミュレーションされた水平解像度20kmの地域気候モデルである。計算内容は全球大気・海洋結合モデル(CGCM2, 大気:経度2.8度×緯度2.8度メッシュ, 海洋:経度2.5度×緯度0.5~2度)を境界条件として、1981~2000年の20年間を再現したものである。さらにIPCCによる経済重視で地域志向が強まると仮定した「SRES A2シナリオ」に準拠して将来の気温や降水量の予測計算を行っている。データは1981~2000年の再現結果と2031~2050年、2081~2100年の予測実験結果を有している。

石狩川流域はRCM20の53メッシュの中に含まれており、その53メッシュの値を利用して解析を行った。

流域月平均気温では、現況再現結果に対して、全ての月で気温は上昇し、年間で50年後に1.8℃、100年後に3.0℃の上昇と試算されている。一方、流域月別降水量では50年後、100年後ともに増加傾向が見られ、50年後は年間で約25%、100年後は約6%の増加となっている。

4.2 RCM20の補正手法

気温、降水量ともに1kmメッシュから最も近いRCM20のメッシュの値を用いてメッシュデータを作成し、モデ

ルに含まれるバイアスの補正手法に関して検討した。

(1) 気温

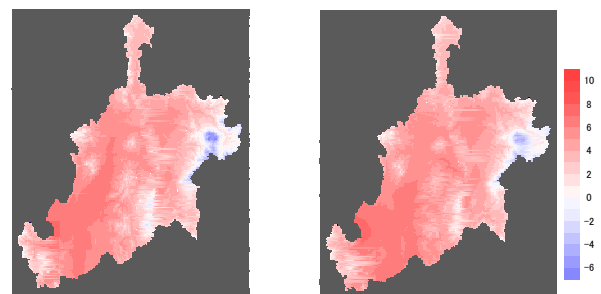
気温には、標高依存性があるのでそれを利用して補正を行うこととした。モデルバイアスの検出とダウンスケールの手順を以下に示す。

- ① 流域とその近辺の気象官署、アメダスの月別平均データを1981~2000年の期間で収集し、気温減率(0.6℃/100m)で標高補正し、標高0mのデータセットを作成する。
- ② 上記をKriging法で1ヶ月毎に1km×1km単位で空間補間する。
- ③ RCM20のメッシュに対応するように20kmメッシュの月平均値を求め、 T_o とする。
- ④ RCM20の20年間のメッシュ値を月別に平均し、気温減率(0.6℃/100m)で標高補正し、標高0mのデータセットを作成し、 T_c とする。
- ⑤ T_o と T_c を比較して、月別のバイアス補正值 $\Delta T=T_o-T_c$ を求める。
- ⑥ 将来予測値にも同様のバイアスがあると考え、同様のバイアス補正值を用いて一律に補正する。なお、月別のバイアス補正值をその月に含まれる日データ全てに当てはめる。
- ⑦ ⑥で得られた20kmメッシュ値の日データについて、1kmメッシュの標高によって気温減率(0.6℃/100m)で補正し、1kmメッシュの日データを作成する。

以上の手順によってバイアスを補正し、ダウンスケールした結果を図-3に示す。図は全て年平均気温を表し、左は今回提案したRCM20をダウンスケールした結果、右は1998~2001年の実測値を標高補正しKriging法で空間補間した結果である。図を見ると、今回提案した手法と実測値から作成したものの分布は近いものとなっており、RCM20出力値のバイアス補正、ダウンスケール後の再現性は良好である。よって、今回用いたバイアス補正とダウンスケール手法により、RCM20の出力値を補正、

表-2 気象要素の補間方法

要素	補間方法
気温	バリオグラムを用いたKriging法
日射量	
日照時間	
降水量	経度、緯度、標高の線形回帰式+残差の距離重みによる補間
降雪深	
湿度	距離重みによる補間



提案手法 (20年平均)

実測値から作成したもの (1998~2001年の4年平均)

図-3 年平均気温分布図

空間補間して流出計算を行う。

(2) 降水量

降水量も気温と同様に標高依存性があると考え、同じ手法を試みたが、対象とした観測所は標高5~400mの地点に多く、標高の高い地域のデータ数が少ない上に欠測が多いので明確な標高依存性を得ることができなかった。

今回は、降水量は補正を行わずに1kmメッシュから最も近いRCM20のメッシュの値をそのまま使うこととした。降水量は1kmメッシュ毎に相対湿度を用いた雨雪判別式⁴⁾により臨界温度 T_c を計算し、降雨か降雪か判別して計算を行う。

5. 計算結果と分析

5.1 RCM20 データによる再現計算と実測値との比較

RCM20 データを用いて水文諸量を再現計算し、実測値との比較からダウンスケール手法の妥当性を考える。計算に用いた値は、気温、降水量はRCM20の1981~2000年の日データを同一日で平均し、前章で行った補正手法に従ってデータを作成した。その他の気象要素は年変動に対する感度が小さいとし、1998年の観測値から作成した日データを使用した。実測流量(1981~2000年の同一日の平均値)に灌漑用水の最大取水実績量を加算した結果と、RCM20再現計算と現況再現計算(1998~2001年)の日単位出力値を月平均した結果を図-4に示す。ここで、最大取水実績量は取水記録より水利権量の72.3%と推計される。図より7、8月で実測に比べて過少となっているが、波形は似たような結果となった。なお7、8月の誤差要因は取水量を過大設定していると考えられるため、今後実績取水量の把握が必要と考えられる。

5.2 将来予測計算の条件設定

将来の水循環の変化を予測するために、2つのケースで計算を行った。1つは、RCM20の将来予測値を用いた計算(RCM20感度計算)である。メッシュデータの作成は前節の再現計算と同様に行った。もう1つは、気温上昇のみを考慮した計算¹⁾(気温感度計算)である。ここでは1998~2001年の観測値から作成したデータを用いて、2050年に+1.8℃、2100年に+4.4℃の気温上昇を年間一律で与えて計算を行った。

5.3 将来予測計算結果の分析

RCM20感度計算と気温感度計算の流域水収支を表-3に示す。

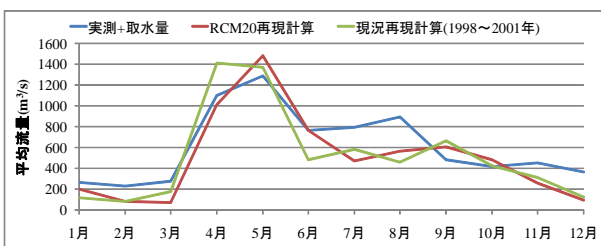


図-4 流出計算の結果(月別平均流量) (石狩大橋)

まず、降雨量と降雪量については、RCM20感度計算結果では、2050年に4章で述べた降水量の増加が降雨量、降雪量両方に表れている。2100年では気温が上昇したことによって、降雪量が11%減少している。

2050年の気温上昇量は年平均で+1.8℃でRCM20と気温上昇の場合ともに同じである。しかし、蒸発散量の増加率には5%の差があった(RCM20の場合で+11%、気温上昇の場合で+6%)。本解析では大気~地表面の熱収支より蒸発散量を算出するので、年間一律で気温上昇した場合に比べ、気温の地域、季節変化に伴い潜熱フラックスが変化し、蒸発散量が変動したと考えられ、それによって結果の差が現れたと考えられる。

次に、流量の変化について考察する。図-5はRCM20感度計算を行った結果で、図-6には気温感度計算の4年間の同一日の平均流量を表している。対象箇所は、石狩大橋地点とする。図-5、図-6ともに4月から5月にかけての流量の増加、融雪期後期の流量減少が見られ、徐々に融雪のピークが早まっていく結果となった。また、表-4に月別の平均流量を示す。RCM20感度計算の結果は2000年に比べ、2050年、2100年ともに年平均流量は増加しているが、気温感度計算の結果は減少している。一方、融雪期である3~6月の流量を比較すると、両結果ともに、3~4月に増加、6月に減少が見られた。以上の結果より、気象変化による降水量の変化や気象要素の空間分布を考慮した将来予測でも、気温感度計算の結果と同様に、融雪期の早期化や融雪流出後期の流量減少を引き起こすことが確認された。

6. 水資源への影響

前章で示した流量の変化が石狩川流域内の水利用に与える影響について検証するために、現在の石狩川流域内の水利用状況を整理し、特に影響が出ると予想される灌漑用水について影響を評価した。

水利用の内訳では、発電と灌漑で全体の約97%を占めている。灌漑に関して見れば、石狩川流域内の灌漑用頭

表-3 流域水収支と平均気温

単位はmm/yr	降雨量	降雪量	蒸発散量	流出高	平均気温(℃)
RCM20(2000年)	1056	650	743	963	5.0
RCM20(2050年)	1375	728	826	1276	6.8
RCM20(2100年)	1236	577	836	977	8.0
1998~2001年再現	1012	767	518	1262	5.2
気温上昇(2050年)	1026	753	551	1228	7.0
気温上昇(2100年)	1101	678	603	1176	9.6

表-4 月別平均流量 (単位は m³/s)

月	RCM20			気温上昇のみ		
	2000年	2050年	2100年	現況	(+1.8℃)	(+4.4℃)
1月	199	194	193	115	125	205
2月	81	75	73	81	86	135
3月	71	78	139	179	318	649
4月	1010	1723	1793	1419	1582	1385
5月	1482	1574	1281	1369	1117	735
6月	765	639	498	480	357	228
7月	470	484	351	581	526	474
8月	563	688	645	458	437	411
9月	604	661	570	669	650	623
10月	486	570	461	422	410	389
11月	262	510	337	310	332	397
12月	96	140	126	125	153	295
年平均	509	613	540	519	509	495

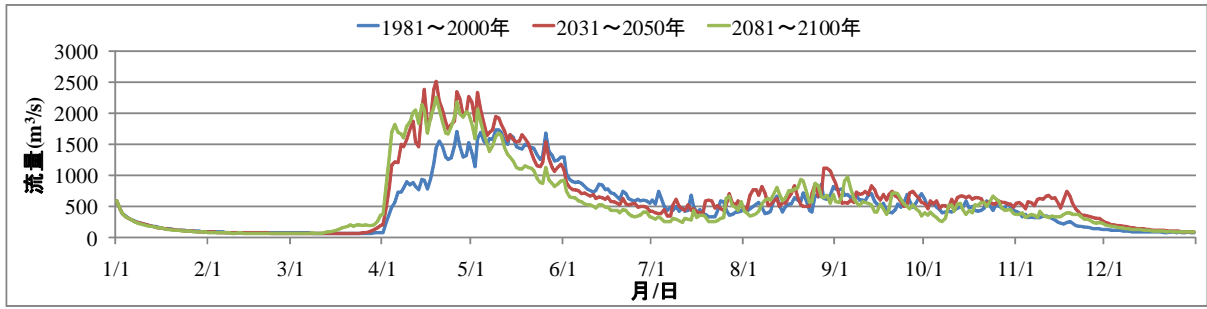


図-5 RCM20 感度計算による流量の変化予測結果 (石狩大橋地点)

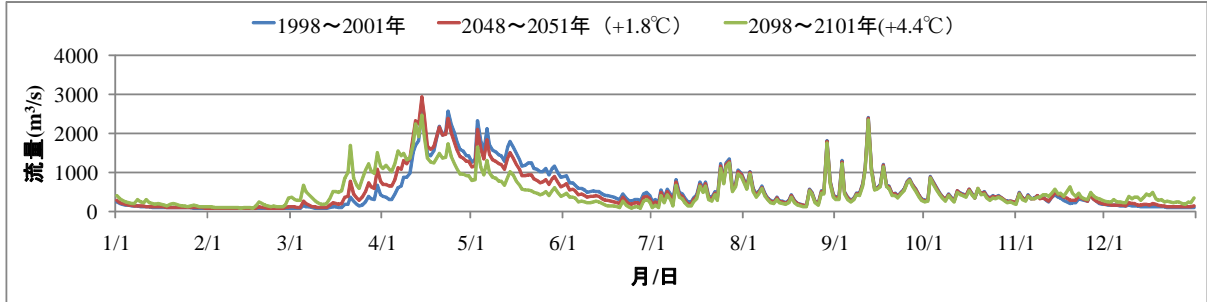


図-6 気温感度計算による流量の変化予測結果 (石狩大橋地点)

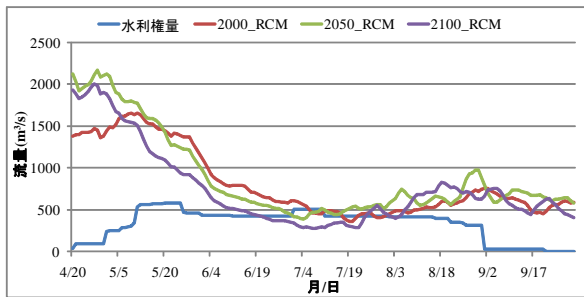


図-7 水利権量と日別流量の比較 (石狩大橋地点)

首工の多くは5月中旬の代掻き期と7月上旬に冷害対策として行われる深水灌漑期に水利権量が多くなっていることが確認された。

図-7に灌漑期間(4~9月)の流量(前後5日平均)と石狩大橋地点までの灌漑用水の最大取水量の日単位の比較を示す。図を見ると、全期間ともに7月の河川流量は少なく、特に2100年では6月中旬から約1ヶ月間は水利権量を下回っている。また2100年の7月は他期間に比べても流量が少ない。これらより、将来、融雪流出後期の深水灌漑で支障を期す可能性が示唆された。

7. まとめ

本報告で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 気象庁・気象研究所の地域気候モデル(RCM20)の気温の再現結果と気象観測値を比較し、月別平均毎にモデルバイアスを検出し、補正を行った。
- 2) バイアス補正を行った気温を標高差によりダウンスケーリングを行った。その結果、平均気温の分布を概ね再現することができた。
- 3) RCM20の再現結果、近未来予測値、21世紀末予測値を用いて、石狩川流域の水収支を試算した。その結果、気温上昇のみを考慮した結果と同様に融雪流

出後期の流量減少が見られた。

- 4) 石狩川流域内の水利用状況を整理し、将来の河川流量の試算結果と比較した。融雪流出後期の流量減少と水需要期間(深水灌漑期)が重複し、計画通りの取水を行うと、水不足になる可能性が示唆された。

以上のような積雪地域の水不足へのリスクを回避し、適応していくために、現在の水利用の実態をより正確に把握し、総合的な水管理方策の検討を行っていくことが望ましい。

謝辞: 本論文をまとめるにあたり、気象庁地球環境・海洋部気候情報課からは地域気候モデル(RCM20)を用いたSRESシナリオA2による日本の気候変化予測結果を提供いただいた。また、北海道開発局石狩川開発建設部計画課からは石狩川の利水関係の情報を提供いただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 川村一人, 中津川誠, 臼谷友秀: 気候変動が積雪寒冷地流域の水利用へ及ぼす影響の推定, 水文・水資源学会 2009年度研究発表会要旨集, pp.134-135, 2009.
- 2) 財団法人 北海道河川防災研究センター, 石狩川流域ランドスケープ情報, 1998.
- 3) 臼谷友秀, 中津川誠, 工藤啓介: 石狩川流域における水循環の定量化, 北海道開発土木研究所月報 No.628, pp.18-34, 2005.
- 4) 近藤純正編著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 5) 本山秀明, 小島賢治: 積雪深変化の推定(乾雪の場合), 低温科学, 物理編, 44, pp.15-25, 1985.
- 6) 中津川誠, 濱原能成, 星清: 積雪変化を考慮した長期流出計算, 水工学論文集, 第47巻, pp.157-162, 2003.