

統計的ダウンスケーリング手法に基づく

将来の気候変化が豊平川流域の水資源量へ及ぼす影響に関する研究

Study on Effects of Future Climate Change on Water Resources in Toyohira River Basin Based on Statistical Downscaling Method

室蘭工業大学 学正員 ○大谷圭吾 (Keigo Otani)
 室蘭工業大学 学生員 谷口陽子 (Yoko Taniguchi)
 室蘭工業大学 正員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)

1. はじめに

本研究は、地球温暖化による積雪寒冷地の水資源の逼迫に対する適応策を考えていくための基礎情報を得ることを目的とする。この中では北海道の豊平川流域を対象に、IPCC 第5次評価報告書（以下、IPCC AR5 と称す）に対応した気候変動予測データを用いて地域レベルでの地球温暖化の影響を評価した。IPCC AR5 の RCP（代表濃度経路）シナリオは RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5 と 4 つのシナリオが用意されており、数値が大きくなるほど 2100 年時点での放射強制力が大きくなっている。本研究では、この 4 つの RCP シナリオに基づく 20km メッシュの気候変動予測データを 1km メッシュへ細分化する統計的ダウンスケーリング手法を用いて、北海道の豊平川流域を対象に適用することで、水資源量の変化を定量的に評価する。研究手順を以下に示す。

- 1) IPCC AR5のRCPシナリオを適用した気象庁の気候変動予測モデルであるMRI-NHRCM20（以下、NHRCM20と称す）の現在気候値を現況の観測値との関係からバイアス補正し、その関係を将来気候値にも当てはめ、豊平川流域を対象に統計的ダウンスケーリングを行う。
- 2) 1)で得られた値を用いて長期水循環モデル（Long-term Hydrologic Assessment model considering Snow process, 以下、LoHASと称す）に適用し、現在気候に対する将来気候の積雪量や融雪量等水文データの変化を推算した。

2. 研究方法

2.1 対象流域の概要

豊平川は北海道の中心都市・札幌市の市街を貫流する一級河川石狩川水系の一次支川である。札幌市域の約86%を豊平川流域が占め、市内の水資源の大半を豊平川からの取水に依存している。本研究では、札幌市周辺の治水・利水に重要な役割を果たすこの豊平川流域を対象とする。図-1に対象流域の概要を示す。

2.2 解析データ

本研究では、IPCC AR5 の RCP（代表的濃度経路）シナリオを適用した気象庁の地域気候モデルであるNHRCM20の予測結果を採用する。また、採用した将来予測シナリオは全 RCP シナリオの 4 パターンとする。予測結果については、降水量（降雨・降雪）、海面気圧、地上風速（東西・南北方向）、地上気温、相対湿度、雲



図-1 対象流域・観測地点位置図

表-1 気候変動予測モデルの概要

	MRI-NHRCM20 (気候変動予測モデル)	
	現在気候	将来気候
空間解像度	20km	
予測期間	1984.9～2004.8	2080.9～2100.8
格子サイズ	211×175 (水平) 及び40層 (鉛直)	
将来予測シナリオ	-	RCP2.6/4.5/6.0/8.5
海面水温パターン	HadISST	SST1
積雲対流スキーム	Yoshimura Scheme(YS)	

量（全層・下層）の6項目を対象に、豊平川流域近傍に位置するNHRCM20格子点No.1～No.10の日データを抽出する。また、現況における気温、降水量等の気象観測値は、HP等で一般に公開されている気象官署及びアメダスの情報を用いる。図-1にNHRCM20の格子点を赤丸、豊平川流域付近の気象観測地点の位置を×で示し、表-1に気候変動予測モデルの概要を示す。

2.3 統計的ダウンスケーリング手法

気候変動予測モデルの現在気候値は現況観測値を厳密に再現していないことから、既往検討を参考に、上述したNHRCM20から抽出した6項目についてバイアス補正（月別の順位誤差率一定手法による補正）を行う。バイアス補正は図-1に示すNHRCM20格子点No.1～No.10についてそれぞれ行う。その後、空間補間法により、20kmメッシュから1kmメッシュへ統計的ダウンスケーリング（以下、SDSと称す）を行う。図-2には例として月別の気温のバイアス補正及びSDSの過程を模式的に示す。以下、図の順序に沿って説明を行う。

(1) 空間補間法

バイアス補正を行うためには、NHRCM20現在気候値

の 20km メッシュ格子点と現況観測値を同じ地点で比較する必要がある。しかし、地点データとして点状の現況観測値は一定のスケールを持つ空間平均値である気候

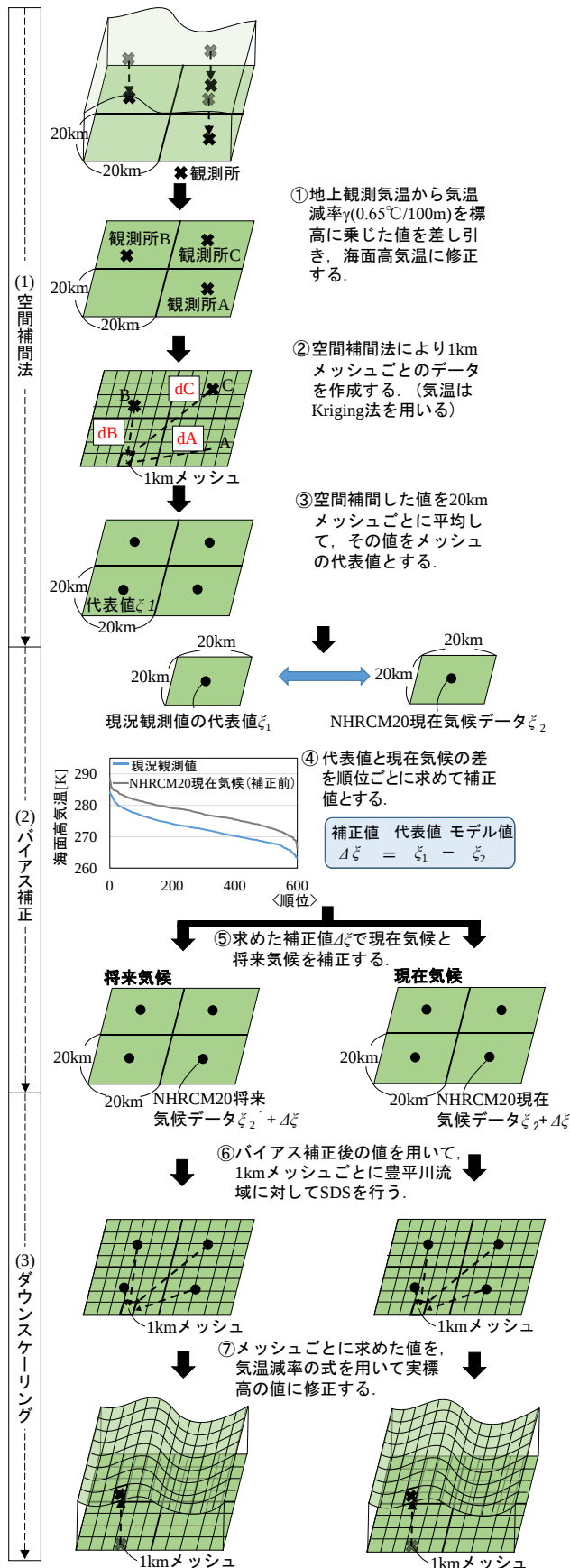


図-2 統計的ダウンスケーリング (SDS) の模式図

モデル出力値と一致しない。したがって、両者のなるべく近い位置で比較を行うために、現況観測値を 1km メッシュ値に空間補間し、それを平均して 20km メッシュ格子点の値を求める必要がある。以下に手順を示す。

- ① 豊平川流域周辺の気象観測データの中で、気温、気圧を海面高の値に補正する。観測点の標高に気温減率 γ ($0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) または気圧減率 γ ($0.114\text{hpa}/100\text{m}$) を乗じた値を加え、海面高気温、海面高気圧を算出する。その他の値は観測データのまゝ用いる。
- ② 現況観測値の空間構造を既往研究²⁾を参考に Variogram で推定し、それによって空間構造が表される場合は Kriging 法でメッシュ化する。表-2 の左側に現況観測値の Variogram の推定結果を示す。メッシュの値は、次に示す式(1)で推定し、その重みは式(2)～式(4)で決める。式(2)は Variogram の定義式を表す。

$$z(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(X_i) \quad (1)$$

$$y(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^{N(d)} \{z(X_i + d) - z(X_i)\}^2 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i y(X_i - X_j) = y(X_i - X_0) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (i=1, \dots, N) \quad (4)$$

ここで、 $z(X_0)$ は任意メッシュ X_0 でのメッシュ気象値、 $y(d)$ は Variogram、 d は観測地点と任意メッシュ間の距離、 $z(X_i)$ 及び $z(X_j)$ は観測所 X_i 及び X_j における観測データ、 λ_i は $z(X_i)$ の重み係数、 $N(d)$ は d 離れた観測所と対をなす観測データ数である。

距離と Variogram に明瞭な関係が見られない場合は、式(5)に示す距離重み法でメッシュ化する。

$$z(X_0) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{z(X_i)/d_i}{\sum_{i=1}^N [1/d_i]} \right] \quad (5)$$

ここで、 $z(X_0)$ は任意メッシュ X_0 でのメッシュ気象値、 $z(X_i)$ は観測所 X_i における観測データ、 d_i は観測地点と任意メッシュ間の距離、 N は d_i 離れた観測所と対をなすデータ数である。

- ③ 空間補間法で求めた現況観測値の 1km メッシュの値を NHRCM20 の 20km メッシュごとに平均し、その値を現況観測地 20km メッシュの代表値とする。

(2) バイアス補正法

- ④ NHRCM20 の格子点毎に月単位で、現在気候値と推定した現況観測値の日データを大きさの順に並べ替える。NHRCM20 の地上風速については、水平方向である東西方向風速と鉛直方向である南北方向風速の二乗和の平方根をとり、それ以外の気象値はそのまま用いる。図-2 のグラフの横軸はデータの順位を表しており、ある月のデータ数は月の日数 $\times$ 20年 (1984年～2004年) = 約 600 より 1位～約 600 位まで存在することになる。並べ替えた日データをもとに、気象値 ζ の順位誤差 $\Delta\zeta$ 海面高気温及び海面気圧については、現況観測値と現在気候値の差分($\Delta\zeta = \zeta_1 - \zeta_2$)、その他の気象項目については、現況観測値と現在気候値の比率($\Delta\zeta = \zeta_1/\zeta_2$)を算出する。

- ⑤ 現在気候値で求めた $\Delta\zeta$ が将来気候においても同一で

あると仮定し、それぞれの順位毎に Δ を用いて現在気候値と将来気候値を補正する。

(3) SDS 手法

ダム流域を 1km メッシュに分割し、川村³⁾らによる既往研究を参考に、以下の手法によりバイアス補正した気候変動予測データに対し SDS を行う。

⑥20km メッシュ値としてバイアス補正された図-1 の No.1～No.10 の値を用いて、豊平川流域へ 1km メッシュごとに SDS を行う。この際 NHRCM20 の空間構造を Variogram で推定し、相関がある場合は Kriging 法、無い場合は距離重み法を用いる。表-2 に NHRCM20 の現在気候と将来気候の Variogram の推定結果を示す。なお、気象要素の空間構造を表す Variogram は各気候ステージに応じて変化するものとする。

⑦海面高気温、海面気圧はバイアス補正を行った気候変動予測データを各 NHRCM20 格子内の 1km メッシュにそのまま SDS をした後、1km メッシュ標高に気温減率 $\gamma(0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m})$ または気圧減率 $\gamma(0.114\text{hPa}/100\text{m})$ を乗じた値を減じて実標高の値に補正する。その他の気象値とは標高補正はせずにそのまま適用する。

2.4 熱・水収支解析モデル (LoHAS)

本研究では、川村³⁾らの既往研究において水文諸量の推定精度の妥当性が確認されている解析モデル LoHAS を採用し、降雪・積雪条件をもとに、日単位でメッシュ毎に水文諸量を算出した。なお、解析に用いた LAI、バルク輸送係数、蒸発効率、アルベド、受光係数比については、口澤⁴⁾らの既往研究で設定されている値を用いた。

3. 結果と考察

3.1 SDS の妥当性の検証

バイアス補正後の 20km メッシュ値と、その値を用いて SDS を行った後の 1km メッシュ値の平均値を比較した。その結果、誤差率は 1%とほとんど同一の値をとることから、本研究の SDS 手法によって適切なダウンスケーリングがなされていることが分かった。

3.2 SDS の結果

豊平川流域への SDS により推定された現在気候及び将来気候における 1km メッシュの気象データを図-3 に示す。この結果から、放射強制力の高い RCP8.5 シナリオでは山岳地帯と比較して平地部での降雪量の減少量が大きく、気温は平地部での上昇量が大きくなっている。また、豊平川流域への SDS により求めた RCP8.5 シナリオと現在気候の気象データを、月別平均でグラフ化したものを図-4 に示す。気温偏差は月別に目立った差異は見られず、通年 4°C 程度上昇するような結果となっている。降水量に関しては、一年を通してあまり変化がないが、降雪量は 11 月～2 月では大きく減少している。

3.3 流域水資源量の評価

LoHAS によって推定された年間水資源賦存量の値を表-3 に示す。この結果から、RCP8.5 シナリオでは平均の水資源賦存量が現在気候の 1,102mm から 939mm へと 15%程度減少している。RCP8.5 シナリオのうち水資源賦存量が最小になる年では 563mm であり、現在気候に対して 50%程度減少していた。これより、現在気候から RCP8.5 シナリオでの最大の水資源賦存減少量は、 $539\text{mm} \times (\text{豊平川取水地点近傍の石山地点収水面積}) 550\text{km}^2 \div 3.0 \text{ 億 m}^3/\text{年}$ となり、札幌市民全体の生活用水 $200\text{L}/\text{人}/\text{日} \times 190 \text{ 万人} \times 365 \text{ 日} \div 1.4 \text{ 億 m}^3/\text{年}$ と比較すると、生活用水への影響の大きさが分かる。また、水資源賦存量が減少していない RCP2.6, RCP4.5 シナリオにおいて

表-2 各気象要素の Variogram の推定結果

現況観測項目	相関式	NHRCM20予測項目	相関式				
			現在気候値	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
気温	$y=1.0 \times 10^{-4}x-0.7059$	気温	$y=2.0 \times 10^{-5}x+0.1632$	$y=2.0 \times 10^{-5}x+0.1928$	$y=2.0 \times 10^{-5}x+0.1993$	$y=2.0 \times 10^{-5}x+0.2262$	距離重み法
降水量	$y=4.0 \times 10^{-4}x+2.8340$	降水量	$y=3.0 \times 10^{-4}x-2.1700$	$y=4.0 \times 10^{-4}x-1.9797$	$y=4.0 \times 10^{-4}x-2.2168$	$y=4.0 \times 10^{-4}x-1.7456$	$y=5.0 \times 10^{-4}x-1.7732$
降雪量	$y=4.0 \times 10^{-4}x-3.0239$	降雪量	$y=2.0 \times 10^{-4}x-3.9473$	$y=3.0 \times 10^{-4}x-3.8889$	$y=3.0 \times 10^{-4}x-4.2392$	$y=2.0 \times 10^{-4}x-3.5195$	$y=3.0 \times 10^{-4}x-4.3480$
雲量	$y=7.0 \times 10^{-7}x-0.0097$	全層雲量	$y=3.0 \times 10^{-7}x-0.0013$	$y=3.0 \times 10^{-7}x+0.0022$	$y=3.0 \times 10^{-7}x+0.0021$	距離重み法	距離重み法
		下層雲量	$y=2.0 \times 10^{-6}x+0.0424$	$y=1.0 \times 10^{-6}x-0.0001$	$y=3.0 \times 10^{-7}x+0.0240$	$y=9.0 \times 10^{-7}x+0.0084$	$y=9.0 \times 10^{-7}x+0.0068$
湿度	$y=1.0 \times 10^{-3}x+3.0239$	湿度	$y=3.0 \times 10^{-4}x+6.7410$	$y=3.0 \times 10^{-4}x+7.4018$	$y=3.0 \times 10^{-4}x+8.1625$	距離重み法	距離重み法
海面気圧	$y=1.6 \times 10^{-5}x-0.4131$	海面気圧	$y=5.0 \times 10^{-6}x-0.0592$	$y=6.0 \times 10^{-6}x-0.0618$	距離重み法	$y=6.0 \times 10^{-6}x-0.0627$	$y=6.0 \times 10^{-6}x-0.0612$
風速	距離重み法	風速	距離重み法	距離重み法	距離重み法	距離重み法	距離重み法

y:Variogram, x:観測地点と任意メッシュ間の距離, x':NHRCM20格子点と任意メッシュ間の距離

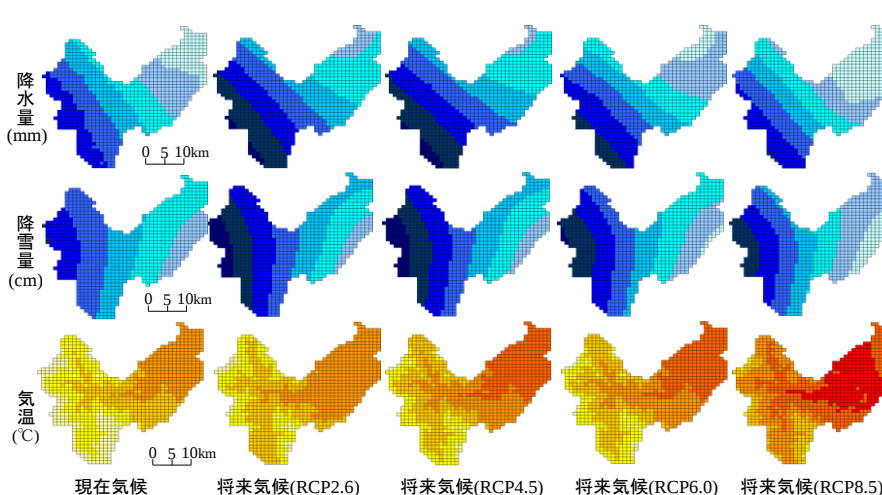


図-3 対象流域の各種諸量の年平均 SDS の結果の空間分布図

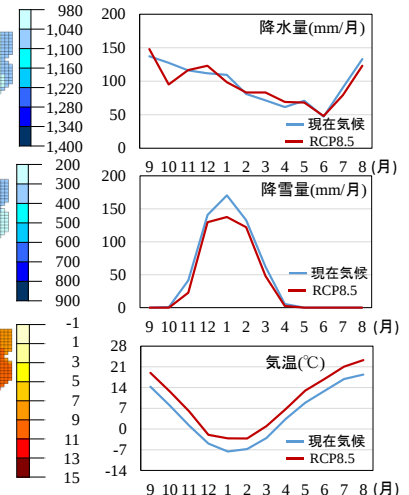


図-4 月別平均 SDS の結果

表-3 豊平川流域の水収支の推定結果

単位: mm/yr

		降雨量 ①	降雪量 ②	降雨量割合 ①/①+②	融雪量 ③	蒸発散量 ④	年最大 積雪水量 ⑤	水資源 賦存量 ⑥=①+②-④
現在気候 (1984.9-2004.8)	平均値	563	974	0.37	930	436	397	1,102
	最大値	807	1,128	0.42	1,050	470	508	1,431
	最小値	399	801	0.33	767	412	248	836
	標準偏差	136.6	91.4	0.60	92.0	17.0	61.2	182.2
将来気候 RCP2.6 (2080.9-2100.8)	平均値	676	600	0.53	887	554	395	1,158
	最大値	1,163	808	0.59	1,114	594	569	1,568
	最小値	421	454	0.48	668	504	258	841
	標準偏差	194.5	92.8	0.68	138.9	24.5	94.32	238.3
将来気候 RCP4.5 (2080.9-2100.8)	平均値	726	884	0.45	856	469	367	1,141
	最大値	994	1,163	0.46	1,109	488	498	1,357
	最小値	402	692	0.37	650	433	233	819
	標準偏差	153.6	132.9	0.54	139.2	15.9	79.33	170.4
将来気候 RCP6.0 (2080.9-2100.8)	平均値	896	644	0.58	628	550	325	990
	最大値	1,226	846	0.59	846	577	498	1,304
	最小値	553	483	0.53	488	529	217	531
	標準偏差	171.9	103.3	0.62	107.6	14.2	83.0	230.9
将来気候 RCP8.5 (2080.9-2100.8)	平均値	897	601	0.60	592	560	275	939
	最大値	1,622	808	0.67	789	598	483	1,735
	最小値	552	454	0.55	435	517	174	563
	標準偏差	265.7	92.8	0.74	93.5	24.6	86.1	271.5

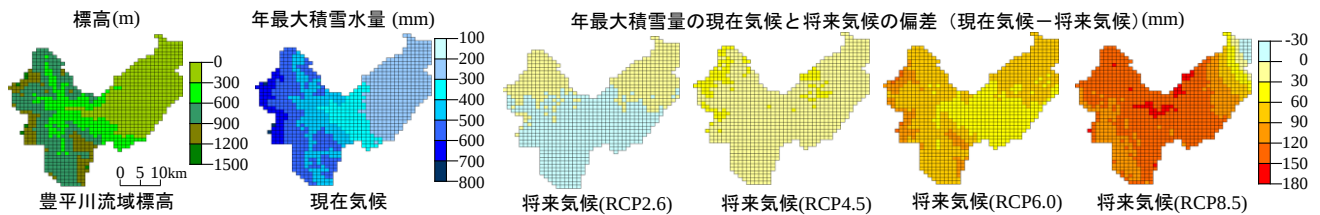


図-6 豊平川流域における標高と各気候ステージの年最大積雪水量の空間分布図

も降水量に対する降雨量の割合が増加しており、RCP8.5 シナリオにおいては現在気候の 0.37 に対して 0.60 と増大している。このことは、雪が雨に変わることによって雪による貯留効果が失われ、水資源の安定供給という点では不利になることを意味する。また、RCP8.5 シナリオでの降雨量の最大値 1,622mm は最小値 552mm の 3 倍程度の値となり、平均量の増減だけでなく、渇水と洪水が起こりうるような変動の増大も懸念される。

RCP8.5 シナリオと現在気候の降雪量と最大積雪水量の 20 年間の月別平均の変化を図-5 に示す。この結果から、RCP8.5 シナリオでは現在気候よりも降雪期間が短くなっており、それとともなって降雪水量も減少している一方、最大積雪水量がピークになる 3 月の時点では、現在気候から 120mm 程度減少している。また、12 月～3 月の期間で降雪水量はほとんど減少していないが、最大積雪水量は大幅に減少していることが分かった。このことから、降雪の一方で融雪が促進されるようなことが示唆される。

さらに、現在気候から将来気候を差し引いた年最大積雪水量の偏差を、豊平川流域へ平面分布したものを図-6 に示す。特に RCP6.0 シナリオでは、標高が高い山岳部での偏差が大きくなり、RCP8.5 シナリオでは、豊平川流域全体で約 100mm 以上減少する傾向が見られた。

4. まとめ

本研究の結果を以下に示す。

- 1) SDS 手法において、SDS 前後の値の平均値を比較した結果、誤差率が 1 % 程度となった。そのため本研究で用いた SDS は妥当であると判断できた。
- 2) 将来気候の最新シナリオである IPCC AR5 の RCP シナリオに沿った予測データである NHRCM20 を SDS することで、具体的な将来気候の変化を推算するこ

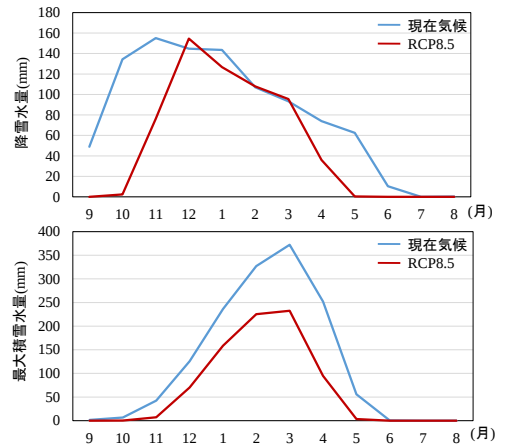


図-5 月別平均降雪水量と最大積雪水量の変化

とが出来た。これを長期水循環モデル(LoHAS)に適用することで将来気候の変化に伴う流域レベルの水文諸量の変化を推算することができた。

- 3) 対象とした豊平川流域では、特に RCP8.5 シナリオにおいて水資源賦存量が現在気候と比較して約 15% 減少すると推算された。また、最も減少が激しい年度では現在気候の半分程度の値となると推算された。水資源賦存量が減少していない RCP2.6、RCP4.5 シナリオにおいても、降水量に対する降雨量の割合の増加などの水文諸量の変化などが見られた。

謝辞：本研究は文部科学省(MEXT)の事業である気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)の助成を受けた。また本研究において、LoHASを用いた解析を行うにあたり、株式会社ドーコン河川環境部の工藤啓介氏に資料の提供と助言をいただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省：水資源分野における気候変動への適応策のあり方検討会、第 8 回、参考資料 3、http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_fr2_000002.html(閲覧日 2016/12/8)。
- 2) 白谷友秀，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報文，No.628，pp.18-34，2005。
- 3) 川村一人，中津川誠：気候変動下における積雪地域の利水への影響を踏まえたダム管理のあり方について，河川技術論文集，第 17 巻，pp.287-292，2011。
- 4) 口澤寿，中津川誠：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定，北海道開発土木研究所月報報文，No.588，pp.19-38，2002。