

## 12.1 積雪寒冷地における気候変動下の農業用水管理に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ（水利基盤チーム）

研究担当者：中村和正、酒井美樹、越山直子、伊藤暢男

## 【要旨】

本研究では、積雪寒冷地での気候変動を想定して、水資源の有効利用が可能な用水管理技術を開発する。平成 23～26 年度の結果は次の通りである。

- 1) 北海道内の農業用ダム(4 箇所)と河川(13 箇所)の 11 年分のデータを用いて、流域の積雪水量を近傍の複数のアメダスデータで推定する手法を開発した。平成 25 年度は、推定に必要となる 2 つの係数の合理的な決定方法を明らかにした。推定の手順を整理し、マニュアル案を作成した。
- 2) 空知地域・上川地域のそれぞれで、複数の水利施設を有する支流域を対象とし、将来の 9 種の気候モデルの予測値を用いて気候変動が農業用水の需要と供給に与える影響を明らかにした。ダムや頭首工の流域では、積雪水量の減少による融雪期流出高と灌漑期流出高の減少と融雪時期の早期化が生じると予測された。融雪流出ピーク日の早期化日数は、流域標高が 100～1800m というように流域に中標高部～高標高部を含み、なおかつ各標高の流域面積の構成に偏りが小さい場合に小さかった。また、平均標高が高い流域では、融雪期（2 月～5 月）流出量や灌漑期（5 月～8 月）流出量の減少割合が低い傾向が見られた。
- 3) 水稲 3 品種を対象に、過去の栽培実績から生育予測式を作成し、将来の 9 種の気候モデルの予測値を用いて、生育時期の変化を予測した。温暖化により移植日あるいは播種日から成熟期までの生育期間は短くなり、成熟期が 4～13 日早まると予測された。
- 4) 将来、頻度が高まると想定される渇水条件下で、水田の水温・地温を低下させないための圃場水管理方法をシミュレーションにより検討した。節水が求められ早朝取水や夜間取水の励行といった取水時間帯の選択が困難な期間では、数日先の気温の低下が予報された場合の冷害対策として湛水深を深めに保つことが有効であることを検証した。
- 5) 気候変動下における融雪期の貯水池管理と灌漑期間中の貯水池管理・送水管理の方針を決定するために必要な手順の概要を示した。

キーワード：気候変動、積雪水量、水温、複合水系、農業用ダム

## 1. はじめに

将来、気候が温暖化すると、気温や降水量、降雪量が増え、各地の水資源利用が影響を受ける。平成 22 年 3 月に策定された食料・農業・農村基本計画などでは、気候変動が水資源の利用に与える影響評価が喫緊の課題であると位置づけられている<sup>1)</sup>。北海道のような積雪寒冷地では、融雪水が重要な水資源であることから、温暖化による積雪水量や融雪時期の変化が農業用水の利用に大きな影響を与えると考えられる。また圃場においても、温暖化による干天日数の増大や積算温度の上昇が、作物の栽培や生育に影響を与えると考えられる。

積雪寒冷地では、気温が長期的に上昇する一方で、冷害対策が必要となるような低温発生のおそれは、

今後も継続すると想定される。そのため、灌漑システムには、低温対策としての深水灌漑に必要な大量の用水確保とともに、低温時の短期的水需要変動の予測技術やこのような水需要変動に対応するための送配水管理技術が求められる。

このような背景から、本研究では次のような研究を進める。

- ① 水利施設管理者が利用できるように、アメダスデータ等を用いた安価かつ簡便な積雪量監視技術を開発する。
- ② 気候モデルの予測値を利用して、気候変動が積雪寒冷地における降水や蒸発散に与える影響を検討する。
- ③ 用水供給にとって重要な情報となる日々の水需

要の想定のため、気象条件と圃場水需要の関係を検討する。

- ④ 農業水利施設における水温上昇施設の機能と作物生産に与える効果について評価する。
- ⑤ これらのデータを用いて用水需給予測や水資源情報を考慮した水管理シミュレーションを行い、気候変動下でも、水源量の管理と適切な配水管理による水の安定供給や好適な水温の確保が可能な農業用水管理技術を開発する。

本報告書では、平成 26 年度に行った検討内容について述べる。

## 2. 農業用ダムでの積雪量の監視技術の開発

### 2.1 目的

北海道のような積雪寒冷地では、灌漑のための水資源として融雪水が重要である。水田灌漑用ダムにおける将来の水収支の試算<sup>2)</sup>から、今後、融雪時期が早まる可能性があること、融雪開始時期の年々変動が大きくなる可能性があること、が示唆されている。それゆえ、将来の気候変動下での水管理にとって、ダムの貯水開始時期において流域に存在する積雪水量の推定が必要となる。しかしながら、山間部にあたる集水域で積雪量調査を行っている農業用ダムの事例は少ない。それゆえ、積雪量の推定手法が必要である。農業用ダムの場合、このような手法としては低コストで簡便なものが望ましい。このような背景から、平地の近傍気象データおよび農業用ダムにおける過去の融雪時期の流量データを用いた積雪水量推定手法を検討する。

### 2.2 方法

#### 2.2.1 積雪量推定モデル

過年度に提案した積雪量推定手法の概要を図-1に示す<sup>3)</sup>。なお、以下の記述で大文字の  $P$  は流域の降水量を、また小文字の  $p$  は流域近傍のアメダス等の降水量を表す。

融雪開始から融雪が終了するまでの水収支は次式で与えられる。

$$\Delta S = P_m + M - E - Q \quad (1)$$

ここで、 $\Delta S$  : 流域貯留量の変化量、 $P_m$  : 融雪期間の降水量、 $M$  : 融雪期間の融雪量、 $E$  : 蒸発散量、 $Q$  : 流出高

融雪期間は土壌が飽和に近いことから、貯留量の

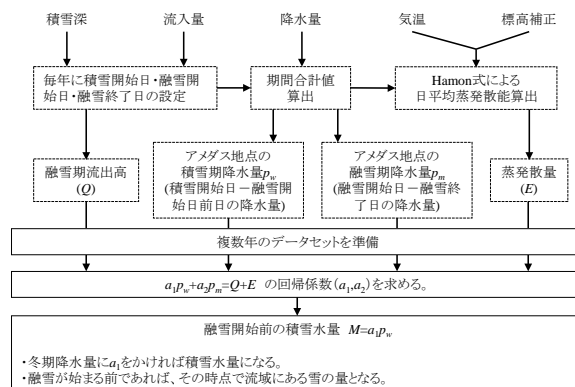


図-1 積雪量推定手法の概要

変化量  $\Delta S$  を無視する。融雪期間の融雪量  $M$  は融雪開始時点の積雪水量に等しい。積雪水量は近傍観測地点での冬期降水量  $p_w$  と係数  $a_1$  を用いて  $M = a_1 p_w$  で表すこととする。融雪期間の降水量  $P_m$  は流域平均値であるが、山地を含むダム流域の降水量は近傍の平地のアメダスより多いのが一般であるため、係数  $a_2$  を乗じて  $P_m = a_2 p_m$  で求めることとする。ここで、 $p_m$  は、流域における融雪開始から融雪終了まで間の、近傍アメダスにおける合計降水量である。これらを式(1)に代入して式(2)を得る。

$$a_1 p_w + a_2 p_m = Q + E \quad (2)$$

したがって、入手可能なデータから式(2)の係数 ( $a_1, a_2$ ) が決まれば、 $M = a_1 p_w$  によって融雪前の積雪水量が算出できる。融雪期間の流出量  $Q$  は過去の流量データを用いる。一方、蒸発散量  $E$  は次の Hamon 式を用いて推定する。なお、日降水量が 10 mm を超える場合は蒸発散量を 0 mm/d とし、それ以外では蒸発散量は  $E_p$  とした。

$$E_p = 0.14 D_o P_t \quad (3)$$

ここで、 $E_p$  : 日平均蒸発散能(mm/d)、 $D_o$  : 可照時間(h/d)、 $P_t$  : 日平均気温に対する飽和絶対湿度( $g/m^3$ )

以上によって(2)式の右辺が定まる。(2)式の左辺、降水量  $p_w$ 、 $p_m$  には近傍のアメダスデータ(図-2)を与え、係数  $a_1, a_2$  の決定には、秀島と星<sup>4)</sup>に倣い流量と降水量の共軸図法を活用した。共軸図法の概念を図-3に示す。この手法により、まず  $a_2$  を決定し、その値を用いて  $a_1$  を決定した。

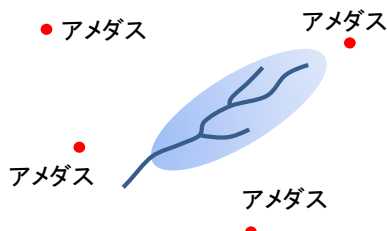


図-2 流域と近傍気象観測地点のイメージ

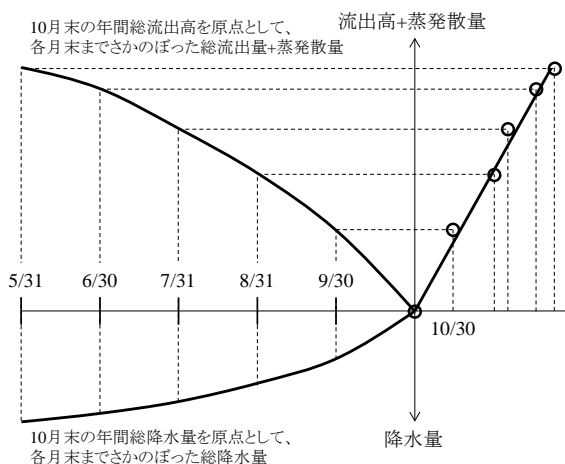


図-3 共軸図法の概念図

### 2.2.2 河川流量を用いた推定精度の検証

北海道内のダム流域4箇所と河川流域13箇所における1998年～2008年の11年分の河川流量とそれらの近傍のアメダスデータを用いて、次のような検討を行った。

- ① 流域近傍のアメダスを4地点選定し、各々の地点の気温、降水量データを収集する。またダム地点や河川の流量データを収集する。
- ② 流域の積雪期（積雪開始日～融雪開始日前日）と融雪期（融雪開始日～融雪終了日）を設定する。積雪開始日は流域下流部に最も近いアメダスの積雪深で根雪が始まったと考えられる日（日最深積雪が5cmに達した日）とする。また融雪開始日と融雪終了日はハイドログラフから決定する。
- ③ ②で決定した流域の積雪期と融雪期について、近傍アメダス4地点の積雪期降水量 $p_w$ と融雪期降水量 $p_m$ を算出する。
- ④ ①で選定した4地点のアメダスデータのうち、1地点のみを用いる場合、2地点あるいは3地点を用いた場合、4地点全て用いる場合の計15通りについて、次の⑤～⑥を行う。

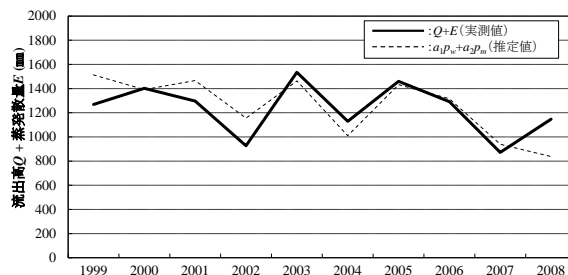


図-4 積雪水量の推定結果（Aダムの事例）

表-1 推定誤差が最小になるアメダスデータの組合せ

流域	地域	アメダスデータ (順位は流量観測点からの距離による)				相対誤差の絶対値の平均(%)
		近傍1位	近傍2位	近傍3位	近傍4位	
Bダム	空知					3.1
泰井江川	空知					4.5
太櫓川	檜山					24.3
Cダム	空知					10.3
女満別川	オホーツク					12.9
漁川	石狩					15.4
鯉淵川	石狩					19.1
堀株川	後志					23.1
利根別川	空知					11.5
美幌川	オホーツク					16.4
オサラッペ川	上川					10.4
穂別川	胆振					10.3
剣淵川	上川					4.8
オソベツ川	釧路					26.7
Aダム	空知					11.2
美瑛川	上川					7.2
Dダム	空知					8.4

- ⑤ 共軸図法を用いて係数 $a_2$ を求める。その $a_2$ を用いて(2)式から $a_1$ を求める。
- ⑥ ①～⑤までの作業で求められる $a_1p_w + a_2p_m$ の推定値と、 $Q + E$ についての実測値（流量：実測値、蒸発散量：Hamon式）を比較し、推定値の相対誤差の絶対値の平均によって、適用性を評価する。

### 2.3 結果と考察

積雪水量の推定結果の一例を図-4に示す。図-4の推定値は、15通りのうち最も相対誤差が小さいものを用いた。2002年や2008年のように観測値と推定値の差が比較的大きい年もみられるが、年々の変動は概ね再現できた。

各流域について、15通りの気象データの与え方のうち、推定誤差（相対誤差の絶対値の平均）が最小となるものは、表-1のとおりである。17流域のうちでは近傍1地点から推定した場合が7流域と多く、次いで近傍2地点あるいは3地点から推定する場合が各々5流域であった。また近傍4地点のアメダス

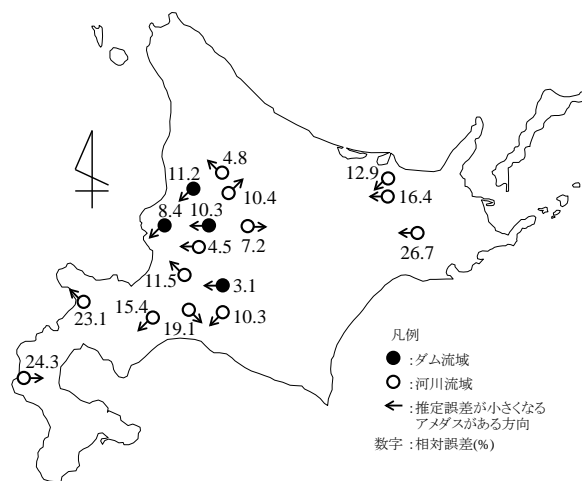


図-5 各流域の相対誤差

データのうち、最も遠いアメダスだけによる場合の推定誤差が最小の地点もある。このことから最も近いアメダスだけで推定するのではなく、近傍の4地点程度のデータの選択による推定を比較することが必要である。

また表-1に示すように、流域ごとの推定誤差の最低値は、3.1%~26.7%の範囲であり、平均では12.9%であった。このうち、推定誤差が比較的小さかったのは空知地域と上川地域である。これらの地域での相対誤差の平均値は7.9%である。農業農村整備事業のための河川協議の実務<sup>5)</sup>を参考にして、実用上許容できる誤差を20%程度とすると、本手法は、空知地域と上川地域での利用は可能と考えられる。図-5には17流域の位置と相対誤差の値に加えて、相対誤差が最も小さくなるアメダスのある方向を表した。空知地域や上川地域では、冬期の降雪時の卓越風向での風上側にあるアメダス地点を推定に用いることにより、精度良く推定できる。石狩地域、オホーツク地域、胆振地域でも相対誤差は20%以内ではあるが、今回の検討流域数だけでは本手法の利用の可否の判断は難しい。後志地域、檜山地域では相対誤差が20%を超えた。その理由として、この2地域の事例流域では、風上側が海岸に近く、推定に有効な気象観測点が少なかったことが考えられる。

## 2.4 小括

農業用ダム流域の積雪水量の簡易な推定手法として、入手の容易なアメダスデータ等を用いた方法の推定精度を検証した。流域周辺の4地点の気象デー

タを適宜組み合わせれば、空知地域と上川地域では8%程度の推定誤差で積雪水量が推定可能であることがわかった。このことを論文<sup>6)</sup>にした。

## 3. 気候変動による用水需給変動量の解明

### 3.1 目的

積雪寒冷地の灌漑では、融雪流出の果たす役割が大きい。将来、気候が温暖化すれば、融雪時期の早期化によって、灌漑システムの水収支が変化する。温暖化による融雪流出の変化の現れ方は、流域の標高によって異なると考えられる。たとえば、一つの流域の中に、複数の貯水池や取水施設がある場合には、それらの流域の標高の違いによって、融雪流出の早期化の程度の違いが生じると想定されることから、温暖化への対応にはそれらの施設の連携した管理が必要になると考えられる。ここでは、複数の気候モデルの予測値を用いて、温暖化による融雪流出の変化や、その変化に流域の標高が与える影響について検討する。

### 3.2 方法

#### 3.2.1 概要

農業ダムから用水供給を行っている利水システムをモデル流域とし、現況(過去20年間:1980年~1999年)と将来におけるダム流入量と河川の区間流入量をタンクモデルにより推定する。得られた流量を用いて、現況と将来の融雪時期の変化や融雪期間・灌漑期間の流出量の比較を行う。

#### 3.2.2 対象流域

検討対象の流域の概要を図-6および図-7に示す。図-6は空知地域、図-7は上川地域にある流域である。両流域とも、北海道内で水田灌漑を目的とする2箇所(2箇所)のダムと1箇所の頭首工を含む流域である。両地域のダムや頭首工地点における流域の標高別構成割合を図-8および図-9に示す。

#### 3.2.3 流出モデル

流出解析には、流域の長期流出解析に適している直列4段貯留型タンクモデルを用いた(図-10)。現況(1980年~1999年)の近傍アメダスにおける気温・降水量を入力データとし、各地点の流量を再現できるように、降水量の補正倍率やタンクモデルの係数を決定した。なお、C頭首工地点の流量は、上流のダムにおいて貯留を行わなかったと仮定してモデルの同定を行った。また、F頭首工地点の流量は、上流のDダムの運転、水田地帯の取水・排水の影響を受けるため、非灌漑期(9月~翌4月)の流量を

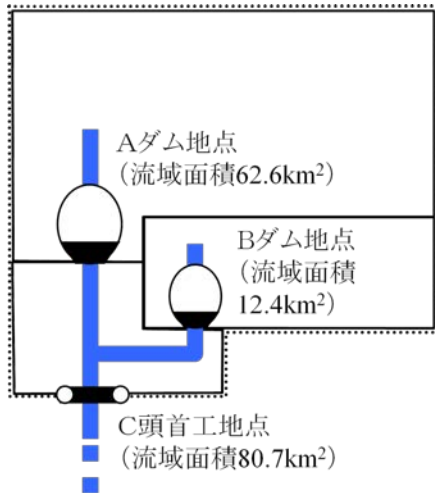


図-6 検討対象流域（空知地域）

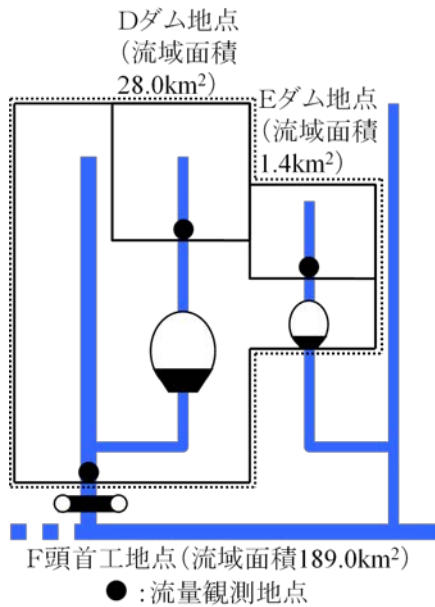
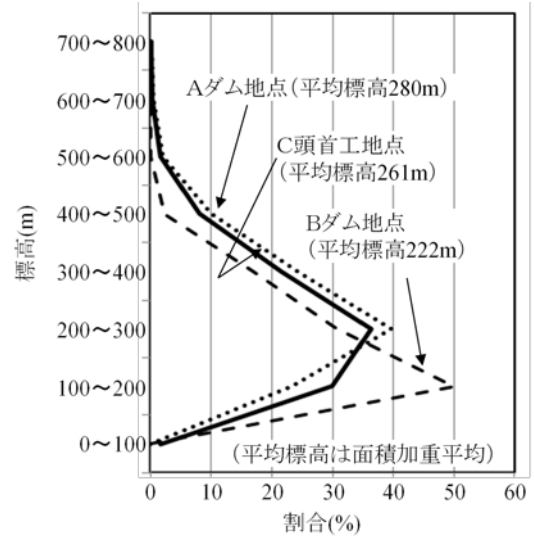


図-7 検討対象流域（上川地域）

用いてモデルの同定を行った。

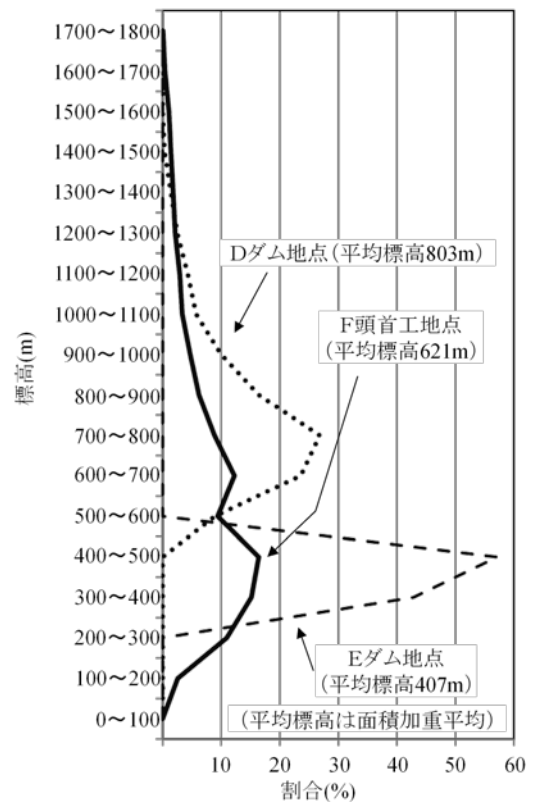
### 3.2.4 将来の流出予測

3.2.3 で係数を決定した流出モデルに、気候モデルによる 2046 年～2065 年の気温と降水量の将来予測値を入力して、将来の流出特性の変化を現況と比較した。現在、多様な気候モデルが提案されている。個々のモデルはそれぞれ独自のモデル化の考え方を有していることから、将来の流出特性を 1 つの気候モデルのみで予測すると、結果にはそのモデルの特徴が大きく影響する。そのため、本研究では「気候変化上乘せ法」<sup>7)</sup>を活用し、9 種類の気候モデルを用いることとした。温室効果ガス排出シナリオとして



平均標高: Aダム > C頭首工 > Bダム

図-8 各地点の流域面積の標高別構成割合（空知地域）



平均標高: Dダム > F頭首工 > Eダム

図-9 各地点の流域面積の標高別構成割合（上川地域）

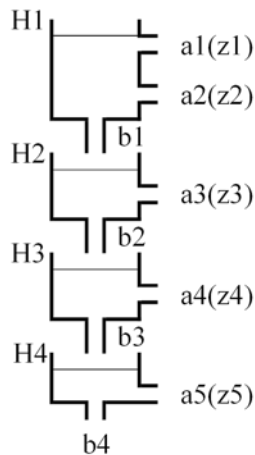


図-10 流出モデル

表-2 気候モデル

空知地域	上川地域
BCCR-BCM2.0	BCCR-BCM2.0
CCSM3	CCSM3
CSIRO-Mk3.0	CSIRO-Mk3.0
ECHO-G	ECHAM5/MPI-OM
GISS-EH	ECHO-G
INGV-SXG	INGV-SXG
MIROC3.2 (hires)	IPSL-CM4
MIROC3.2 (medres)	MIROC3.2(hires)
UKMO-HadGEM1	UKMO-HadGEM1

A1B のモデル（大気中の温室効果ガス濃度が 21 世紀末頃に 20 世紀末の約 2 倍）を用いた。

使用した 9 種のモデルは表-2 のとおりである。なお、本研究では京都大学防災研究所<sup>8)</sup>による気象変動情報データベースのデータを利用した。

### 3.3 結果と考察

A ダム地点および D ダム地点を事例として、現況と将来の日流出量のハイドログラフを図-11 および図-12 に示す。各モデルの予測結果は、15 日間移動平均を 20 年間で平均した値である。融雪流出の開始時期やピーク発生時期は、両ダムともに全モデルで現況よりも早期化した。また、融雪期間のピーク流出量は、A ダムでは、全モデルで現況よりも減少し、その減少割合はモデルによって異なっていた。一方、D ダムではピーク流出量は現況よりも多くなるモデルが 4 モデル、少なくなるモデル 5 モデルであった。

融雪ピーク日、融雪期の総流出量、灌漑期の総流出量について、空知地域の現況と将来の比較を図-13

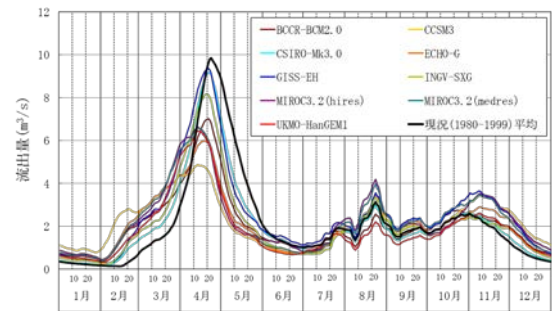


図-11 現況と将来の日流出量（Aダム）

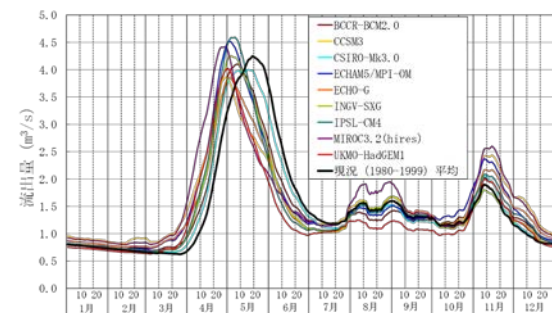


図-12 現況と将来の日流出量（Dダム）

～15 に、上川地域の比較を図-16～18 に示す。

空知地域では、3 地点とも全モデルで融雪ピーク日が早期化すると予測された。早期化の日数は A ダム地点では 6 日程度、B ダム地点では 8 日程度、C 頭首工地点では 9 日程度と予測された。

融雪期（2～5 月）の総流出量は、1 モデルを除いて現況よりも減少する結果となった。減少割合の平均値は 3 地点とも 10% 未満である。モデルごとの結果の分布は、A ダム地点と B ダム地点では 10% 前後の、また C 頭首工地点では 6% 前後の減少が予測されるものが多い。

灌漑期（5～8 月）の総流出量は、3 地点とも全モデルで減少すると予測された。減少割合はモデルごとにばらつきがある。平均値やモデルごとの予測値の分布をみると、減少割合は A ダムで 30% 程度、C 頭首工で 25% 程度、B ダムで 20% 程度である。図-11 をみると、灌漑期の総流出量の減少に関与する現象として、融雪の早期化とともに 11 月～12 月の流出量の増加、すなわち初冬の降雪・積雪の減少が考えられる。標高の高い A ダム流域で灌漑期の総流出量の減少割合が大きい理由は次のように考えられる。標高の高い流域では、現況で 5 月に残る積雪が多い。将来温暖化が進むと 5 月の融雪流出量が大きく減少する。そのため、標高の低い流域に比べて灌漑期の

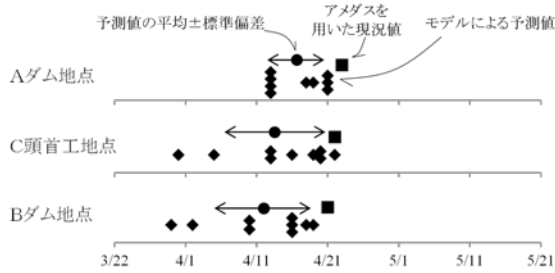


図-13 融雪ピーク日の変化（空知地域）

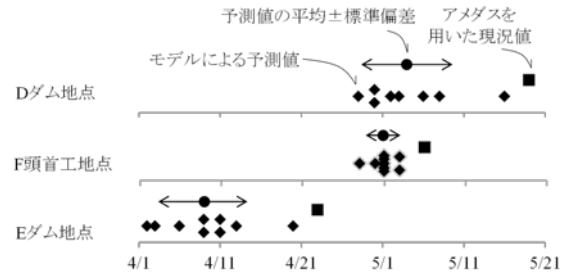


図-16 融雪ピーク日の変化（上川地域）

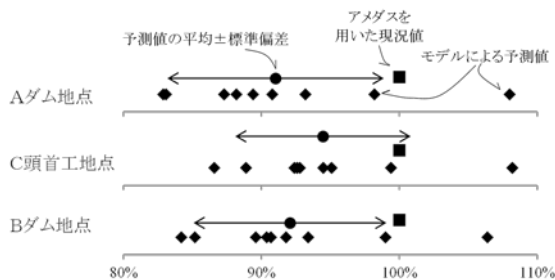


図-14 融雪期（2月～5月）の総流出量の変化（空知地域）

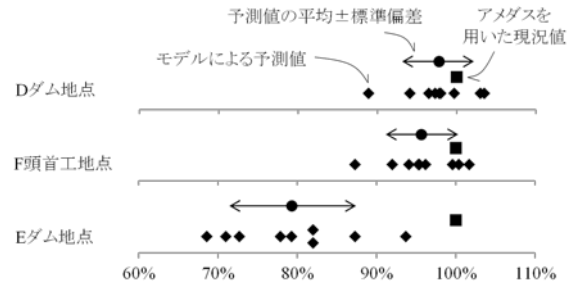


図-17 融雪期（2月～5月）の総流出量の変化（上川地域）

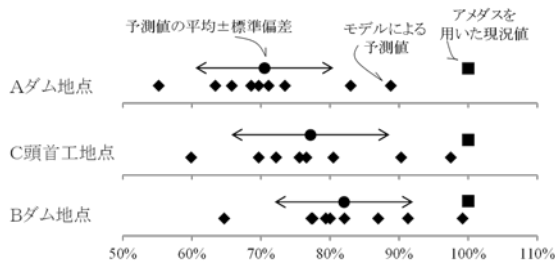


図-15 灌漑期（5月～8月）の総流出量の変化（空知地域）

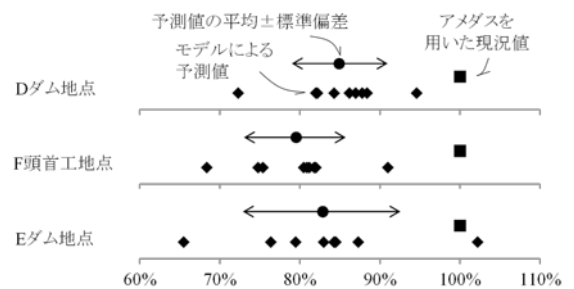


図-18 灌漑期（5月～8月）の総流出量の変化（上川地域）

総流出量の減少割合が大きくなると考えられる。

上川地域でも、3地点とも全モデルで融雪ピーク日が早期化すると予測された。早期化の日数は両ダム地点では15日程度、F頭首工地点では5日程度であった。

ここで、F頭首工地点での早期化日数が小さい理由を考察する。図-19に、Dダム、Eダム、F頭首工の各流域の現況と将来の標高100mごとの融雪量を示す。各標高区分からの融雪量 (mm/d) は、その標高区分の面積からの融雪量を、流域全体の面積で除した値である。この値は流域全体からの融雪量に対する、その標高区分の融雪量の寄与の大きさを示すものである。融雪量は日融雪量の20年平均値で示した。将来の融雪量はMIROC3.2(hires)で求めた気温

から求めた。このモデルは融雪時期のピーク流出量および後述する融雪期総流出量が9モデルの平均値に最も近いモデルである。図-9に示すように、Dダム地点は標高600m～900m間の流域面積が大きい。Eダム地点は標高300m～500mの区分だけで構成される。これらの流域では、面積割合の高い標高範囲の融雪早期化日数が、それぞれの流域全体での融雪ピーク日の早期化日数に対して大きな決定因子になっている。F頭首工地点は、ダム2地点と比較して、流域を構成する標高区分の偏りが小さい(図-9)。図-20にはDダム地点とF頭首工地点の流域の融雪量を、標高1,000m以上の区域からのものと、それ以外のものに分けて示したものである。現況の融雪量のピーク日は、標高1,000m未満の区域の融雪量のピーク日である。この標高区分の融雪量のピーク日

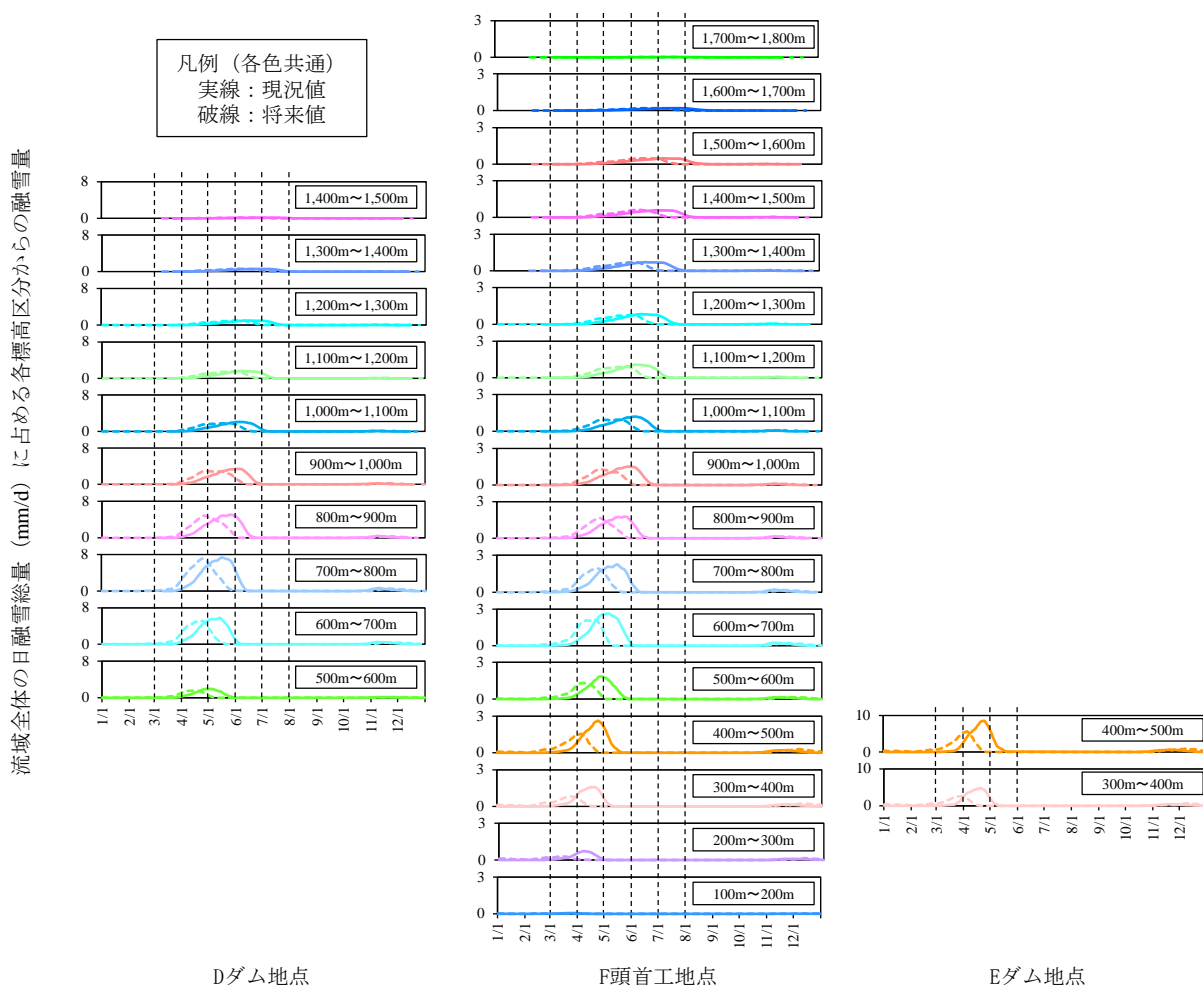


図-19 各地点の標高 100m ごとの融雪量

は将来 16 日程度早期化する。しかし、将来は、この標高区分の融雪量が減少するために、1,000m 以上の標高範囲の融雪量のピーク日が、流域全体の融雪量のピーク日の決定因子になっている。一方、D ダム地点では、融雪量のピーク日の決定因子となる標高範囲が、現況と将来で変化しない。これらのことが F 頭首工地点で融雪ピーク日の早期化日数が少なかった理由である。流域を構成する標高範囲が大きく、なおかつ偏りが小さい場合には、融雪時期の早期化が緩和されると考えられる。

融雪期（2～5 月）の総流出量は、D ダム地点では 2 モデル、F 頭首工地点では 2 モデルを除いて現況よりも減少する結果となった。減少割合の平均値は D ダム地点と F 頭首工地点では 5% 未満であるが、E ダム地点では 20% 程度と大きな減少がみられた。

図-19 に示すように、E ダム地点は流域に高標高

部を持たないため減少の程度が大きい。D ダム地点と F 頭首工地点では流域の低標高部の融雪流出は減少するが、中標高部～高標高部において、現況では 6 月以降に生じていた融雪流出が早期化し、2 月～5 月の融雪流出を増大させる。そのため、これらの 2 地点では融雪期総流出量の変化が小さい。

灌漑期（5～8 月）の総流出量は、E ダム地点では 1 モデルを除いて減少すると予測された。減少割合はモデルによってバラツキがある。平均値やモデル毎の予測値の分布をみると、減少割合は D ダム地点と E ダム地点では 15% 程度、F 頭首工地点では 20% 程度である。

図-18 に示すように D ダム地点と F 頭首工地点の減少率を比較すると、平均標高の高い D ダム地点の方が小さい。これらの 2 地点では、融雪流出のうち、4 月末までに流出する量が増えるため、灌漑期の流



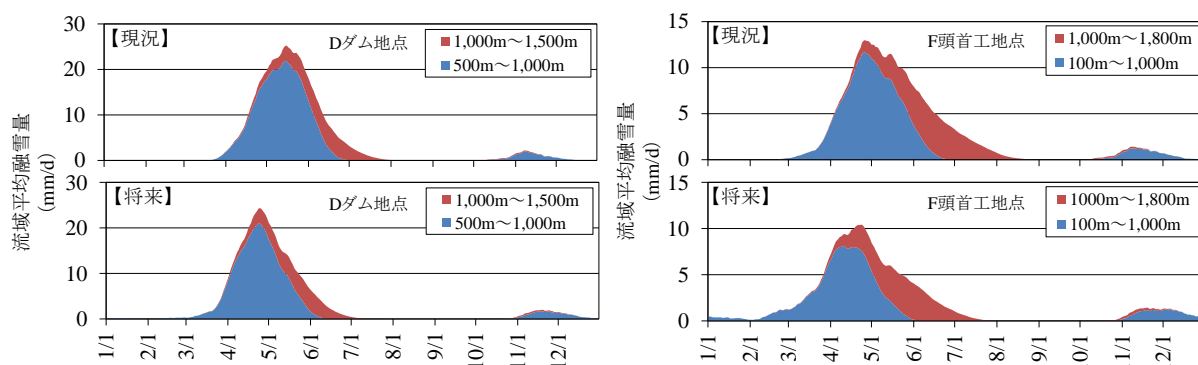


図-20 標高1,000mで区分したDダム地点とF頭首工地点の融雪量

出量が減少する。この減少の程度は、平均標高が高いほど小さい。しかし、F頭首工地点とEダム地点を比較すると、平均標高の低い後者の方が、灌漑期総流出量の減少率が小さい。Eダム地点での減少率が小さい理由は、現況でも融雪の大部分が4月末までに終了していて、将来の融雪の早期化が灌漑期の総流出量に与える影響が小さいからである。このように、温暖化によって灌漑期総流出量の減少率が大きいのは、必ずしも平均標高が低い流域ではなく、高標高部をある程度含んでいて、現況で5月にも融雪流出が継続しているような流域である。

空知地域の対象流域は、いずれも平均標高が200m~300mであり、標高1,000mを超える区域はもたないものであった。上川地域の対象流域では、流域間の平均標高に差があり、なおかつ標高1,000mを超える区域を含む流域である。このような流域を対象としたことで、図-19や図-20を用いて述べたような、特定の標高範囲の面積割合が高いDダムやEダムと、標高区分の面積割合の偏りが比較的小さいF頭首工との温暖化の影響の現れ方の違いを明らかにすることができた。

### 3.4 小括

将来の気候変動が、融雪時期の早期化や流出量に与える影響を、空知地域と上川地域のそれぞれで、流域の平均標高が異なる3地点における流出予測により分析した。得られた結果のうち、空知地域の結果を論文<sup>9)</sup>にした。図-13~図-18に示した結果は、対象地域や流域標高が異なるため、両地域の結果から定量的な評価をすることは難しい。しかし、流域の標高の違いに関わらず融雪開始時期は早期化し、融雪期および灌漑期の流量は減少した。そして早期化や流量の減少の程度は流域標高の違いにより異な

った。さらに流域に高標高部を含む場合では、流域標高の分布の偏りの有無が、流出変化に影響することがわかった。

これらのことから、水利施設が近傍にあっても流域の標高が異なる貯水施設・取水施設では温暖化で生じる渇水の程度は異なる。それゆえ、水利施設間の連携による水管理を検討する必要がある。

## 4. 気象変化と短期圃場水需要の応答変動の解明

### 4.1 目的

北海道では、将来の気候変動によって積雪量・融雪時期が変化し、水源の水資源量の不足によって節水型の送配水管理が求められる年が増加すると予想される。また、降水頻度や連続干天日数の変化も想定される。一方、将来、全体的に温暖化が進む中で、冷害発生危険のあるような年も生起するといわれている<sup>10)</sup>。それゆえ、需要面からみると、急な低温日への対応として湛水深を深める場合の用水需要の短期的増大が生じる可能性がある。

将来の安定した用水供給のためには、灌漑期間中の降雨頻度の長期的変化への対応の要否の検討が求められるほか、節水が求められる年であっても、急な低温時に冷害対策として湛水を深めるための用水供給方策が必要である。後者のような節水の必要な年に、配水管理用水量を抑制するためには、数日単位の気象変化によって生じる圃場水需要の予測が必要である。

本章では、用水需要に影響を与える気候の変化傾向の分析と、短期的な気象変化に対する圃場での水需要の変化のモデル化を行う。

平成23年度は、短期的な水需要変動の傾向を考える上で必要な将来の気候の変化傾向を、2種類の気

候モデルによる予測値を用いて整理した。また、農業農村整備事業の計画検討で参考とされる農業気象項目について、北海道内6地点のデータベースを作成した。

平成26年度は、水田圃場での水需要の変化をモデル化するために、水稻の生育モデルを作成し、近年と将来の生育時期を比較した。また、水稻の生育モデルから生育時期を予測し、灌漑期間中の圃場水管理計画と併せて、必要となる圃場取水量を求めるモデルを作成した。さらに、様々な取水形態を想定した圃場群への必要配水量を求めるモデルを作成した。これらのモデルは、平成23年から実施している圃場観測データを活用しながら作成した。

本章では、これらの結果について述べる。

## 4.2 将来の気候変化傾向の整理

### 4.2.1 方法

#### (1) 気候モデルの再現性検証

研究に用いた気候モデルは、RCM20（気象庁気象研究所地域気候モデル）とMRI-AGCM（気象庁気象研究所全地球モデルのうち、21世紀気候変動予測革新プログラムに出されている成果）であり、図-21に示す期間のデータを用いた。道内6地点（図-22）のアメダス値と、そのアメダス観測所を囲む気候モデルの格子点（図-23）から気象要素（気温・降水量・風速）を抽出し、各気候モデル格子点から最も相関の高い格子点を選定し、観測値との誤差やモデルの特徴を整理した。

#### (2) 各気候モデル値の補正方法の検討

気候モデル格子点値とアメダス観測値の誤差を、以下に示す3種類の方法により補正し、補正結果を比較した。気温と風速については①と②の2種類の、また降水量については①、②、③の3種類の補正方法を適用した。

##### ① スプライン曲線を用いる方法<sup>3)</sup>

気温については、まず月ごとにモデル値と観測値の平均気温の差を求める。つぎに横軸を月日としたグラフの各月の中心に、求めた気温差をプロットし、これらをスプライン曲線で結んで毎日の補正值（気温差）を求める（図-24）。モデル格子点値の日データにこの補正值を加えて補正を行う。

降水量、風速については、月ごとにモデル値と観測値の比（補正係数）を求め、気温と同様にグラフにプロットした点をスプライン曲線でつないで毎日の補正係数を求め、日データの補正を行う。

##### ② 回帰式を用いる方法

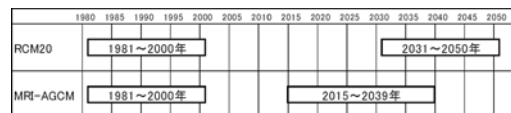


図-21 予測値の期間



図-22 アメダス地点

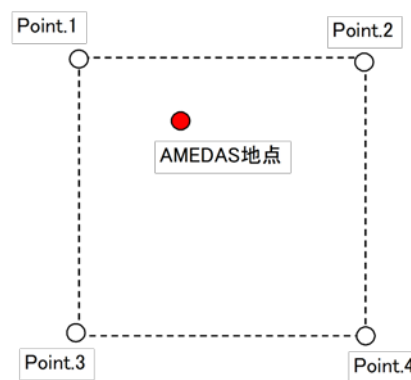


図-23 気候モデルの格子点

降水量、気温、風速の月別値について、各気候モデルに対し、格子点値と観測値の相関分析を行い、回帰式を求めて補正を行う。期間全体の日データに対して同一の回帰式で補正を行う。

##### ③ ハイブリッド法<sup>11)</sup>

降水量の格子点値と観測値について、極値(全体の上位0.5%)のデータセットとそれ以外のデータセットを分けてそれぞれに補正係数を算定し別々に補正を行う。極値のデータセットについては全体の降水量の比を補正係数とする。その他のデータセットについては月別値の比から月ごとの補正係数を求める。格子点の日データに対し、極値(上位0.5%)であれば極値の補正係数、それ以外では月別の補正係数により補正を行う。

この補正方法を、降水量だけに適用する理由は、4.2.2.(4)で述べるデータベース作成において、最大日雨量等の極値に関する値を求める必要があるため

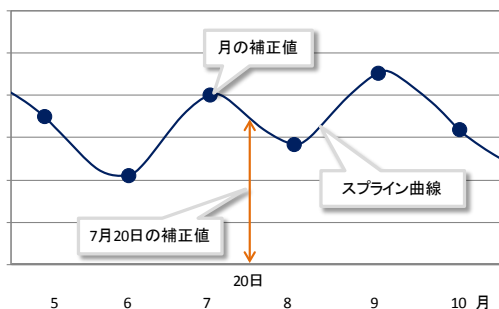


図-24 スプライン曲線を用いる補正

ある。

### (3) 将来値の変化傾向検討

各気候モデルの将来値を補正して設定 (RCM20 : 2031年～2050年、MRI-AGCM : 2015年～2039年) し、気象要素の変化傾向を整理した。

### (4) 将来の農業気象データベース作成

補正した将来値を用いて、データベースとして取りまとめた。

## 4.2.2 結果

### (1) 気候モデルの再現性検証

気温については、いずれの気候モデルにおいても全ての地域で相関係数が0.97以上となり再現性が高いことが示された。

降水量については、相関係数が、RCM20で0.71～0.98、AGCMで0.76～0.97となり、地域によって差があり気温と比較すると再現性が低い結果となった。

風速については、相関係数が、RCM20で-0.46～0.81、AGCMが0.61～0.98となり、地域によって差があり気温、降水量と比較して再現性が低い結果であった。また、全ての観測地点でAGCMの相関係数がRCM20より高かった。

### (2) 各気候モデル値の補正方法の検討

気温については、スプライン曲線あるいは回帰式を用いた2方法で補正方法を検討した。気温は補正しない場合でも観測値との誤差(RMSE(平均二乗誤差))が0.42～2.48と小さかったが、スプライン曲線による補正でRMSEが0.0～0.1℃と小さくなった。回帰式による補正ではRMSEが最大で1.1℃とスプライン曲線による補正と比較して誤差が大きかった。これらを考慮して気温についてはスプライン曲線を用いる補正方法を選定した。

降水量については、回帰式による補正結果はRMSEが8.0～43.8mmと地点によりばらつきが大き

く、全ての地点で他の2つの補正方法よりも相関係数が小さく誤差が大きかった。スプライン曲線とハイブリッド法の補正結果を比較すると、相関係数はスプライン曲線が0.97以上、ハイブリッド法が0.88以上といずれも高い相関を示した。しかし、降水量は最大日雨量の算出等における極値の再現性と、月平均値の補正における再現性の両者が同時に求められるため、ハイブリッド法を選択した。

風速については、スプライン曲線による補正のRMSEが0.04m/s以下と非常に小さく、回帰式による補正と比較して全ての地点で相関係数が高い。このため、スプライン曲線を用いる補正方法を選んだ。

### (3) 将来値の変化傾向検討

気象要素の変化傾向は以下のとおりであった。

- ① 平均気温については両気候モデルとも、将来に向けて上昇傾向を示す。再現期間(1981～2000年)ではAGCM・RCM20とも15.1℃であった平均気温がAGCMの近未来(2015～2039年)平均で1.0℃、RCM20の近未来(2031～2050年)平均で1.8℃上昇する予測となる。
- ② 降水量については、両モデルとも増加傾向を示す。再現期間では両モデルとも年降水量で平均614mmであったがAGCMの近未来では17.5mm増加、RCM20では平均で117.9mm増加する予測となる。
- ③ 降水日数については、両モデルとも増加傾向を示している。再現期間ではAGCMで平均72日、RCM20で67日であった降水日数がAGCMの近未来では75日、RCM20では77日に増加する予測となる。
- ④ 干天日数については、しきい値を降水5mm未満とした場合も1mm未満とした場合も緩やかな減少傾向を示している。これは先の降水日数の増加傾向に対応したものと考えられる。降水1mm未満を干天日とした場合、RCM20では再現期間と比較して近未来(2031～2050年)の干天日数は10日間減少する予測となる。
- ⑤ 平均風速については、年ごとの強弱の変化はみられるものの再現期間全体の平均値と近未来全体の平均値では大きな差がなく、AGCMでは平均で0.02m/s減少し、RCM20では0.13m/s減少する。

### (4) 将来の農業気象データベース作成

補正した将来値を用いて、農業気象データベースを作成した。作成したデータベースの例を表-3に示す。

表-3 作成した農業気象データベースの例

(RCM20)

(AGCM)

観測所	旭川	統計期間	2031年～2050年			観測所位置	142.3717E 43.7567N			観測所標高	120m		
			項目	単位	5月		6月	7月	8月		9月	10月	5～10月
平均気温	(°C)		14.9	19.2	22.3	22.6	17.9	10.8	18.0				
平均降水量	(mm)		67.3	71.8	120.0	132.7	145.0	123.8	660.6				
平均降水日数	(日)		11.5	7.9	8.8	12.1	13.6	14.8	68.5				
平均風速	(m/s)		2.3	2.0	1.5	1.3	1.5	1.6	1.7				
平均干天日数	(日)		26.2	26.3	26.5	25.4	23.5	23.9	151.7				
平均積算温度	(°C)		462.6	576.5	690.8	699.4	538.0	333.9	3301.3				
旬別平均作業可能日数	(日)		上 7.7 中 7.4 下 9.1	8.1 8.4 8.2	8.5 7.6 8.6	7.5 7.7 7.4	7.0 6.9 6.7	7.3 6.5 7.5					

観測所	函館	統計期間	2031年～2050年			観測所位置	140.7533E 41.8167N			観測所標高	35m		
			項目	単位	5月		6月	7月	8月		9月	10月	5～10月
平均気温	(°C)		14.2	17.2	21.2	23.1	19.9	13.6	18.2				
平均降水量	(mm)		128.6	143.4	127.8	197.1	199.7	156.7	953.4				
平均降水日数	(日)		12.7	14.8	19.2	20.0	19.6	17.7	103.9				
平均風速	(m/s)		2.8	3.0	2.4	2.4	2.8	2.9	2.7				
平均干天日数	(日)		24.0	22.6	22.9	22.3	20.5	22.2	134.3				
平均積算温度	(°C)		440.1	516.8	657.2	716.4	598.0	421.9	3350.4				
旬別平均作業可能日数	(日)		上 7.3 中 7.0 下 7.7	7.0 6.6 6.3	5.9 6.3 7.1	6.1 5.9 5.6	5.4 5.4 5.9	6.3 5.9 7.0					

観測所	釧路	統計期間	2031年～2050年			観測所位置	144.3767E 42.985N			観測所標高	4.5m		
			項目	単位	5月		6月	7月	8月		9月	10月	5～10月
平均気温	(°C)		9.3	13.0	17.0	19.2	17.0	11.7	14.5				
平均降水量	(mm)		172.6	149.6	116.9	125.9	155.2	123.9	844.1				
平均降水日数	(日)		12.5	11.0	14.1	14.8	15.4	13.9	81.5				
平均風速	(m/s)		4.1	3.4	2.7	2.6	3.2	3.7	3.3				
平均干天日数	(日)		24.3	23.7	24.4	24.3	22.5	24.6	143.7				
平均積算温度	(°C)		288.5	389.5	528.1	596.5	510.1	364.0	2676.5				
旬別平均作業可能日数	(日)		上 6.9 中 6.4 下 7.7	7.2 7.4 6.8	7.0 7.0 7.8	7.1 7.2 7.0	6.4 6.0 6.8	7.1 6.7 7.6					

観測所	旭川	統計期間	2015年～2039年			観測所位置	142.3717E 43.7567N			観測所標高	120m		
			項目	単位	5月		6月	7月	8月		9月	10月	5～10月
平均気温	(°C)		12.3	17.9	21.8	22.1	17.0	9.9	16.8				
平均降水量	(mm)		62.6	68.3	133.6	128.3	145.4	118.9	657.1				
平均降水日数	(日)		13.5	11.4	16.4	15.0	15.0	18.6	90.1				
平均風速	(m/s)		2.1	1.8	1.7	1.6	1.5	1.7	1.7				
平均干天日数	(日)		26.5	25.3	23.6	24.8	22.9	23.4	146.6				
平均積算温度	(°C)		382.3	538.3	676.5	685.3	510.2	306.2	3098.8				
旬別平均作業可能日数	(日)		上 7.3 中 7.4 下 8.6	7.7 7.4 7.9	6.3 6.4 7.7	6.8 6.9 7.7	6.3 7.0 6.8	6.6 6.2 6.6					

観測所	函館	統計期間	2015年～2039年			観測所位置	140.7533E 41.8167N			観測所標高	35m		
			項目	単位	5月		6月	7月	8月		9月	10月	5～10月
平均気温	(°C)		12.5	16.7	20.8	22.7	19.3	12.8	17.5				
平均降水量	(mm)		88.3	79.8	122.9	179.2	141.9	97.6	708.8				
平均降水日数	(日)		11.1	10.5	12.3	13.6	10.8	12.7	71.0				
平均風速	(m/s)		3.1	2.8	2.7	2.9	2.9	3.2	2.9				
平均干天日数	(日)		26.2	26.6	26.3	24.0	24.4	24.8	152.2				
平均積算温度	(°C)		388.1	500.8	645.5	703.0	577.6	397.1	3212.0				
旬別平均作業可能日数	(日)		上 7.4 中 7.7 下 8.3	7.7 7.7 7.8	7.5 7.1 8.1	6.5 6.7 7.5	7.3 7.4 7.4	7.4 6.9 8.1					

観測所	釧路	統計期間	2015年～2039年			観測所位置	144.3767E 42.985N			観測所標高	4.5m		
			項目	単位	5月		6月	7月	8月		9月	10月	5～10月
平均気温	(°C)		8.5	12.4	16.4	18.4	16.4	11.2	13.9				
平均降水量	(mm)		97.1	90.6	124.5	159.7	145.8	92.4	710.2				
平均降水日数	(日)		11.8	10.4	13.4	14.1	11.7	10.0	71.5				
平均風速	(m/s)		3.8	3.2	3.0	3.1	3.2	3.8	3.4				
平均干天日数	(日)		26.2	26.3	26.6	25.8	24.5	25.6	155.0				
平均積算温度	(°C)		264.6	373.2	508.2	568.8	491.0	346.7	2552.6				
旬別平均作業可能日数	(日)		上 7.4 中 7.3 下 8.4	7.6 7.8 7.7	7.1 7.1 7.8	6.7 6.8 7.9	7.2 7.3 7.1	7.9 7.3 8.6					

### 4.3 水稻の生育時期の予測および圃場取水量・必要配水量の予測

#### 4.3.1 方法

##### (1) 生育予測モデルの作成

生育時期の予測対象とした水稻品種は、北海道内で栽培されている品種のうち、きらら 397、ななつぼし、ほしまるの3品種である。生育時期の予測対象の品種+栽培方法の組合せは、実際に行われている栽培方法を考慮して、(1)きらら 397の移植栽培、(2)ななつぼしの移植栽培、(3)ほしまるの湛水直播栽培、(4)ほしまるの乾田直播栽培とした。

水稻栽培では、生育段階によって、湛水深管理の基本的な考え方が異なるため、圃場における用水需要量や受益地への用水供給量も異なる。本研究では、水管理の切り替わる生育段階として表-4に示す7期を予測対象とした。

生育時期の既往の予測手法には、簡易有効積算気温を用いる手法<sup>12)</sup>や発育速度(Developmental Rate, DVR)の積算値を用いる手法<sup>13)</sup>がある。しかし、これらの予測手法では表-4に示す7期全てを予

測できず、節水運用の計画をたてるには不便である。このため、新たに積算気温を用いた生育時期の予測手法の作成を試みた。

予測手法の作成には、表-5に示す品種+栽培方法の各組合せについて、公表されている生育実績データとその地域の気温観測値を用いた。播種日は、気温がある値に達した日として予測することとした。その値は、実績で播種が行われた日の気温とした。播種日を除く6期の生育時期は、播種日前日を0とする積算気温で予測することとした。播種日の気温や残る6期の積算気温は、北海道中部—空知地域と上川地域—の複数の地域について算出した。さらに品種+栽培方法の組合せごとに、北海道中部の平均値を算出した。

横軸を積算気温とし、縦軸を生育時期ごとに設定した数値(例えば、出穂期は8)として折れ線グラフを作れば、折れ線を構成する各直線の一次関数式が、各生育段階の間の生育予測式となる。この一次関数式に積算気温を代入すれば、各生育段階に達する月日が予測できる。以下では、この方法を一次関数式と記す。

予測精度の検証は、生育実績の月日と、一次関数式による予測日を比較しておこなった。また、既往の2種類の予測手法でも生育予測を行った。

**(2) 近年と将来の生育時期の比較**

温暖化による生育時期の変化を予測するために、近年と将来の生育時期の比較を行う。近年および将来の各生育時期は、3種類の予測手法のうち、生育時期ごとの再現性が最も良かった予測手法から求めた。品種+栽培方法の組合せごとに、各生育時期の月日の予測値を近年と将来で比較した。近年は2004年～2013年、将来は2046年～2065年とした。近年の播種日には、複数の地域の播種日を平均した日を与えた。この月日は、将来の播種日としても使った。予測手法に与える積算気温は、きらら397とななつぼしには岩見沢市地点の積算気温を、ほしまるには上富良野町地点の積算気温を与えた。岩見沢市は北海道内で水稲作付面積が最も大きい市町村である。ここでは、きらら397とななつぼしの作付面積を合わせると、水稲作付面積全体の約80%を占める。上富良野町近辺は、近年、直播栽培の取り組みが進んでいる地域の1つであり、ほしまるは、直播栽培で栽培される品種のうち代表的なものの1つである。

近年の気温は実測値を用いた。一方、将来の気温は、3.2.4と同様の手法<sup>7)</sup>で、表-6に示す9種類の気候モデルの値を用いて求めた。

**4.3.2 結果と考察**

**(1) 予測精度の検証**

表-7に予測精度の検証結果を示す。検証結果として、生育実績の月日に対する予測日の誤差の絶対値の平均値を、3種類の予測手法について示した。表-7の中で、平均誤差の最大値は、一次関数式については5日であり、2種類の既往の予測方法についても4日である。このように、一次関数式による予測精度は、既往の予測方法と遜色がない。それぞれの生育時期の予測精度は、3種類の予測手法間で優劣がある。それゆえ、生育時期ごとに用いる予測手法を選択すれば、各生育時期を精度良く予測できる。この考え方を採用すれば、たとえば、きらら397の移植栽培でみると、生育時期ごとの平均誤差の最大値は、幼穂形成期と出穂期に対する3日である。水田地域への配水量の調整が半旬程度でなされることを考慮すれば、この誤差は実用的に許容できると考えられる。

**(2) 温暖化による生育時期の変化**

表-8に近年と将来の生育時期の比較結果を示す。

表-4 予測する生育時期と既往の予測手法で予測できる生育時期

生育時期	品種と栽培方法			
	きらら397 移植栽培	ななつぼし 移植栽培	ほしまる 湛水直播栽培	ほしまる 乾田直播栽培
播種日	○	○	○	○
移植日	○	○	-	-
活着期	○	○	-	-
分けつ期	○	○	-	-
幼穂形成期	○	○	○	○
出穂期	○	○	○	○
成熟期	○	○	○	○

活着期から成熟期は、各期の最初の日を予測する。

表-5 各品種の生育実績

品種	栽培方法	実績数	収集期間(年)
きらら397	移植栽培	51	1999～2013
ななつぼし	移植栽培	6	2011～2013
ほしまる	湛水直播栽培	2	2011
ほしまる	乾田直播栽培	6	2011,2013

表-6 採用した気候モデル

空知地域	上川地域
GFDL-CM2.0	MIROC3.2(hires)
UKMO-HadCM3	CCSM
MIROC3.2(medres)	ECHO-G
UKMO-HadGEM1	UKMO-HadGEM1
INM-CM3.0	INM-CM3.0
CGCM3.1(T47)	INGV-SXG
GMRI-CGCM2.3.2	GISS-EH
FGOLS-gl.0	PCM
GISS-AOM	CSIRO-Mk3.0

将来の予測日は、将来の9通りの気温を与えて求めた予測日の平均である。各生育時期は概ね早期化し、同じ生育時期でも栽培方法によって早期化の程度は異なる。移植日は9日早まり、成熟期は移植栽培で12日程度、湛水直播栽培で9日、乾田直播栽培で9日早まる。これらは2046年～2065年の平均値であるので、年によっては、早期化日数がさらに大きくなる可能性がある。節水の必要な年であれば、灌漑期間の終盤において、用水が必要な日数があと何日程度なのかを予測することで、貯留水の有効利用につながると思われる。

**4.4 小括**

短期的な水需要変動の傾向を考える上で必要な将来の気候の変化傾向を、2種類の気候モデルによる

表-7 各予測方法による生育時期と栽培実績との差

生育時期	きらら397 移植栽培			ななつぼし 移植栽培		ほしまる 湛水直播栽培		ほしまる 乾田直播栽培	
	一次関数式	簡易有効 積算気温	DVR	一次関数式	簡易有効 積算気温	一次関数式	簡易有効 積算気温	一次関数式	簡易有効 積算気温
播種日	0	-	-	0	-	0	-	0	-
移植日	2	-	-	5	-	-	-	-	-
活着期	1	1	-	0	2	-	-	-	-
分けつ期	1	1	-	0	1	-	-	-	-
幼穂形成期	5	4	3	1	2	1	1	3	2
出穂期	4	4	3	2	3	0	1	1	2
成熟期	2	3	-	3	3	4	0	5	2

「-」は、その予測方法では生育期を予測できず、差が求められないことを表す。

表-8 近年と将来の生育時期の比較

生育時期	きらら397 移植栽培			ななつぼし 移植栽培			ほしまる 湛水直播栽培			ほしまる 乾田直播栽培		
	予測日		近年からの 推移日数	予測日		近年からの 推移日数	予測日		近年からの 推移日数	予測日		近年からの 推移日数
	近年	将来		近年	将来		近年	将来		近年	将来	
移植日	5/22	5/17	-5	5/26	5/20	-6	-	-	-	-	-	-
活着期	5/29	5/23	-6	6/1	5/26	-6	-	-	-	-	-	-
分けつ期	6/6	5/31	-6	6/8	6/2	-6	-	-	-	-	-	-
幼穂形成期	6/30	6/27	-3	6/29	6/22	-7	7/6	7/6	0	7/8	7/10	2
出穂期	7/28	7/23	-5	7/29	7/20	-9	8/7	8/4	-3	8/8	8/4	-4
成熟期	9/14	9/2	-12	9/14	9/1	-13	9/15	9/9	-6	9/18	9/16	-2

マイナスは、近年の予測日よりも将来の予測日が早いことを示す。

予測値を用いて整理した。また、農業農村整備事業の計画検討で参考とされる農業気象項目について、北海道内6地点のデータベースを作成した。

水稻栽培が盛んな北海道で栽培されている水稻品種、きらら397、ななつぼし、ほしまるの3品種を対象に、積算気温を説明変数とする生育時期の予測式を作成し、近年と将来の生育時期を比較した。その結果、各生育時期の月日は積算気温の一次関数式を用いることで精度よく再現できた。また、各生育時期は概ね早期化し、栽培方法で早期化の程度が異なることがわかった。今後は、温暖化による生育時期の変化に起因する灌漑時期や用水量の変化を予測し、安定した用水供給を行う上での将来の課題と対応を考えていきたい。

このほか平成26年には、水利基盤チームの圃場観測データや過去の北海道内での用水量データを併せて分析し、水需要のモデル化を進めた。この結果はさらに精度を要するため、平成27年度の報告書で述べることにする。

## 5. 農業水利施設における水温上昇機能の評価

### 5.1 目的

積雪寒冷地における気候変動では、気温が長期的に上昇する<sup>14)</sup>一方で、冷害対策が必要となるような低温発生の可能性は今後も継続するとされている<sup>10)</sup>。それゆえ、圃場での水温確保に寄与する圃場水管理技術やそれを供給面で支える送配水管理技術の重要性は気候の温暖化後も変わらない。既に述べたように温暖化が進むと積雪寒冷地の水田用水では渇水傾向が強まる。その場合、従来の水温確保のために行われてきた夜間取水や早朝取水といった取水時間帯の選択の自由度が低下するなどの制限条件のある中で、水温確保に有利な圃場水管理手法を選んで実施する必要がある。本研究では、水源から圃場までの区間での水温形成状況をモデル化し、将来の気候変動下での水温確保に有利な水管理技術を検討する。

平成24年度には前年度から観測していた水温上昇のための広幅水路での水温データを用いて、各種気象条件下での水温上昇機能を推定した。平成25

年度は水田圃場での湛水温などの観測データを用いて、取水時間帯や湛水深の違いによる水田圃場内の湛水温をシミュレーションし、取水時間帯や湛水深管理などの各項目の水温確保に対する重要性を評価した。ここでは平成 25 年度の成果について述べる。

## 5.2 方法

### 5.2.1 水温・地温モデルの作成

水田の水温モデルを既往の文献など<sup>15)~17)</sup>を参考に作成した。本検討における水温・地温モデルに必要な機能は、①降雨のない状態における水田圃場内の水温の毎時変化を表せること、②水田圃場への流入水温、取水時間帯、取水量、湛水深、水稻の生育状況、縦方向の浸透量、気象データ(気温、湿度、全天日射、風速等)によって水田圃場内の水温・地温を算出できること、である。

### 5.2.2 水田圃場の水温・地温のモデル式の検証

水田圃場内での実測データを用いてモデル式の検証を行った。具体的には、水田圃場内の毎時の湛水温・地温を算出し、実測値と比較した。用いたデータは、空知地域や上川地域の水田圃場における平成 23 年度から平成 25 年度の水温・地温観測値である。

### 5.2.3 水温・地温のシミュレーション

低温年や水源水温が低い場合において、水田圃場内の水温や地温を上昇させる方策の有効性を検討するため、①取水時間帯の異なる管理が水田水温・地温に与える影響、②湛水深の異なる管理が水田水温・地温に与える影響、③深水管理を行う場合の取水時間帯の影響、をシミュレーションにより推定した。これらの推定における条件を表-9 に示す。なお、気象条件の「低温」は過去 10 年間(2004 年~2013 年)のうち、灌漑期間の平均気温が一番低く、作況指数が最も低かった 2009 年の気温であり、「標準」は過去 10 年間の上川地域の平均気温にほぼ等しかった 2011 年の気温である。また、水源水温の「低い」と「標準」はそれぞれ 2009 年と 2011 年に観測された水源河川の水温である。

## 5.3 結果

### 5.3.1 水温・地温変化のモデル式

水温変化のモデル式は、既往文献<sup>15)~17)</sup>や成書<sup>16)</sup>を参考に次のようなものとした。

$$\rho_w C_w h_w \Delta T_w = NR + SH + LH + GH + QH$$

ここで、 $\rho_w$  : 水の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_w$  : 水の比

熱(J/kg/K)、 $h_w$  : 湛水深(m)、 $\Delta T_w$  : 単位時間あたりの水温変化量(°C)、 $NR$  : 放射収支量(W/m<sup>2</sup>)、 $SH$  : 顕熱伝達量(W/m<sup>2</sup>)、 $LH$  : 潜熱伝達量(W/m<sup>2</sup>)、 $GH$  : 地中伝達熱量(W/m<sup>2</sup>)、 $QH$  : 取水に伴う交換熱量(W/m<sup>2</sup>)

ここで、 $NR$ 、 $SH$ 、 $LH$ 、 $GH$ 、 $QH$  はそれぞれ次の式で算出した。

$$NR = (1 - \alpha_w)SR + \varepsilon_w AR - \varepsilon_w \sigma T_w^4$$

ここで、 $\alpha_w$  : 水面のアルベド(0.05)、 $SR$  : 全天日射量(W/m<sup>2</sup>)、 $\varepsilon_w$  : 水面の射出率(0.95)、 $AR$  : 大気放射量(W/m<sup>2</sup>)、 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数( $5.67 \times 10^{-8}$ (W/m<sup>2</sup>/K<sup>4</sup>))、 $T_w$  : 水温(°C)

$$SH = \rho_a C_p C_H WS(T_a - T_w)$$

ここで、 $\rho_a$  : 空気の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_p$  : 空気の定圧比熱(J/kg/K)、 $C_H$  : 顕熱のバルク輸送係数、 $WS$  : 風速(m/s)、 $T_a$  : 気温(°C)、 $T_w$  : 水温(°C)

$$LH = \rho_a L C_E WS(q_a - q_w)$$

ここで、 $L$  : 蒸発の潜熱(J/kg)、 $C_E$  : 潜熱のバルク輸送係数、 $q_a$  : 空気の比湿(kg/kg)、 $q_w$  : 水面の比湿(kg/kg)

$$GH = \frac{K_s}{h_s}(T_s - T_w)$$

ここで、 $K_s$  : 土壌の熱伝導率(J/K/m/s)、 $h_s$  : 測定深度(m)、 $T_s$  :  $h_s$  (m)の地温(°C)、 $T_w$  : 水温(°C)

$$QH = \rho_w C_w IN_f(T_{in} - T_w)$$

ここで、 $C_w$  : 水の比熱(J/kg/K)、 $IN_f$  : 取水量(m<sup>3</sup>/s)、 $T_{in}$  : 取水時の水温(°C)

このとき、生育状況の変化は既往文献<sup>18)</sup>を参考に、5月1日~8月31日までの123日間について全乾物量で表現することとした。

また、地温の変化は、次に示す一次元の熱拡散方程式を差分化し、陽解法により算出した。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = A_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}$$

ここで、 $T_s$  : 地温(°C)、 $A_s$  : 土壌の熱拡散係

表-9 シミュレーションのケース

シミュレーション No.	条件										
	気象条件		水源水温		取水時間				湛水深		浸透量
	低温	標準	低い	標準	早朝 06-12h	夜間 18-06h	24時間 09-09h	日中 09-15h	深い 15cm	標準 5cm	10mm/d
1	○	—	○	—	○	—	—	—	—	○	○
2	○	—	○	—	—	○	—	—	—	○	○
3	○	—	○	—	—	—	○	—	—	○	○
4	—	○	—	○	○	—	—	—	—	○	○
5	—	○	—	○	—	○	—	—	—	○	○
6	—	○	—	○	—	—	○	—	—	○	○
7	○	—	○	—	—	○	—	—	○	—	○
8	○	—	○	—	—	○	—	—	—	○	○
9	—	○	—	○	—	○	—	—	○	—	○
10	—	○	—	○	—	○	—	—	—	○	○
11	○	—	○	—	—	—	○	—	○	—	○
12	○	—	○	—	—	—	—	○	○	—	○

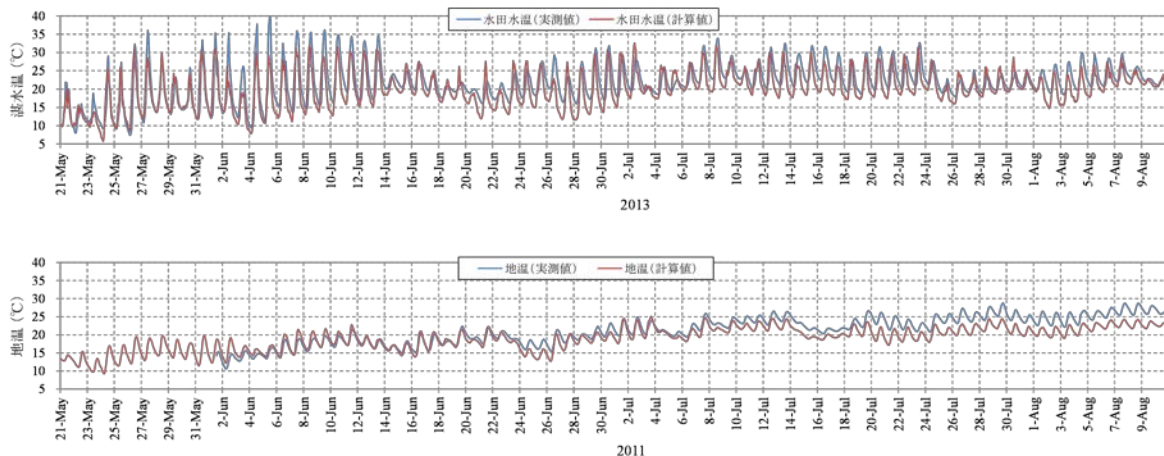


図-25 水温と地温の実測値と計算値

数(m<sup>2</sup>/s)、z : 深度(m)

### 5.3.2 水温・地温変化のモデル式の検証

水田水温と地温の推定結果の例を図-25 に示す。水温・地温ともに実測値に近い値を再現できた。

### 5.3.3 水温・地温のシミュレーション結果

#### (1) 取水時間帯が湛水水温・地温に与える影響

取水時間帯を、早朝(6:00~12:00)、夜間(18:00~翌6:00)、24時間(9:00~翌9:00)とした推定の事例を図-26 に示す。水田水温、地温ともに取水時間帯による大きな違いはみられなかった。

#### (2) 湛水深が湛水水温・地温に与える影響

湛水深を、標準で5cm、深水管理で15cmとした推定の事例を図-27 に示す。水田水温は、標準の水深の方が深水管理に比べて日中に3°C程度高くなる結果となったが、深水管理の方は最低水温が2°C程

度高い結果となった。地温は水温と同様に、深水管理の方が、日中の温度が2°C程度低いが、地温の変化は標準の水深の場合よりも緩やかである。

#### (3) 深水管理を行う場合の取水時間帯の影響

24時間(9:00~翌9:00)、日中(9:00~15:00)とした推定の結果の例を図-28 に示す。水田水温、地温ともに取水時間の長さによる大きな違いはみられなかった。

#### (4) 湯水時の水田水温確保のための圃場水管理

将来、温暖化が進んで積雪寒冷地の水田用水の湯水傾向が強まり、河川から用水路への取水制限が行われた場合、水田圃場への取水時間帯選択の自由度が低下する。そのような取水制限期間中に、水稻の生育に障害を与えるような気温の低下が予報された場合には、取水時間帯の選択にこだわらず、昼間に



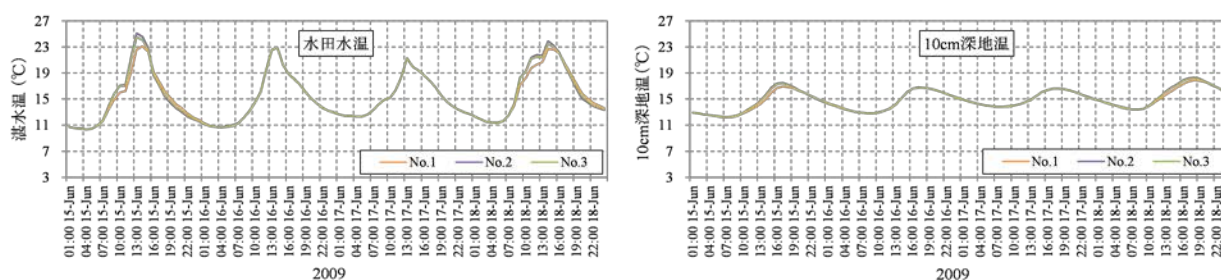


図-26 取水時間帯が異なる場合の水田水温および地温の計算値

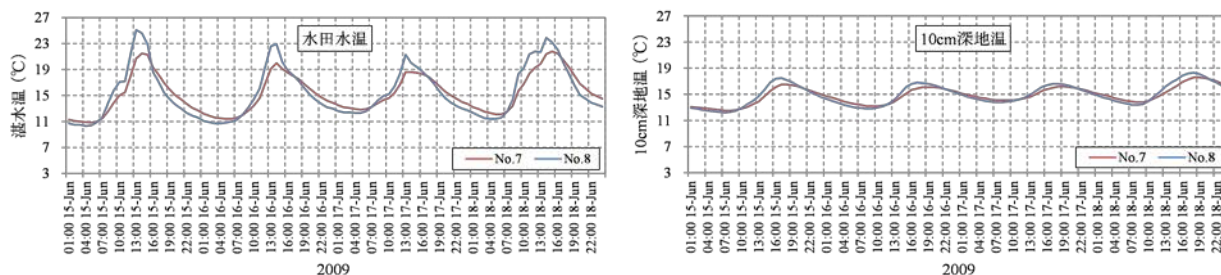


図-27 湛水深が異なる場合の水田水温および地温の計算値

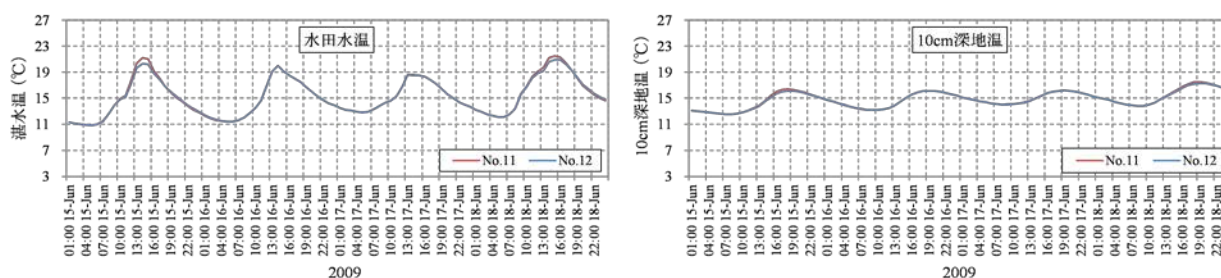


図-28 深水管理を行う場合に取水時間帯が水田水温および地温に与える影響

も取水して湛水深を深めに管理することによる水温・地温の低下抑制が有効である。その場合、取水時間帯や取水時間の長さによる水温・地温の差は(2)および(3)で述べたように小さいと考えられる。取水制限期間中であれば夜間や早朝に集中する傾向のある取水時間帯を昼間にも分散させて配水管理用量を抑制することが有効であると考えられる。

#### 5.4 小括

水田圃場における水温観測行い、その結果を用いて水田圃場での水温の予測モデルを作成した。さらに、そのモデルで取水時間帯や湛水深が異なる場合での水温・地温変化をシミュレーションした。その結果、取水時間帯や取水時間の長さは水田水温・地温に与える影響は小さいこと、水田水温・地温の低下を防ぐには湛水深を深めにすることが有効であることなどがわかった。将来、積雪寒冷地で強まると予想される渇水状況下で、気温の低下が予報された場合に水田水温を確保するためには、湛水深の管理

が重要であり、その場合には取水時間帯が水田水温に与える影響は小さいことを検証した。

## 6. 農業用水管理技術の開発とマニュアルの作成

### 6.1 目的と方法

積雪寒冷地における気候変動では、気温が長期的に上昇する一方で、冷害対策が必要となるような低温年や、冷害危険期における数日間の急な低温の発生のおそれが今後も継続する。そのため、灌漑システムには、積雪量や融雪時期の変化に起因して強まる渇水傾向のもとで、低温対策としての深水管理に必要な用水を適切に温存して必要な時期に供給できるような送配水管理技術が求められる。本章では、2章で取り組んでいる積雪水量の監視技術や4章で取り組んでいる低温時の短期的水需要変動の予測技術、その他の章の成果も活用して、このような送配水管理技術を検討する。

平成25年度には、まず灌漑システム全体における

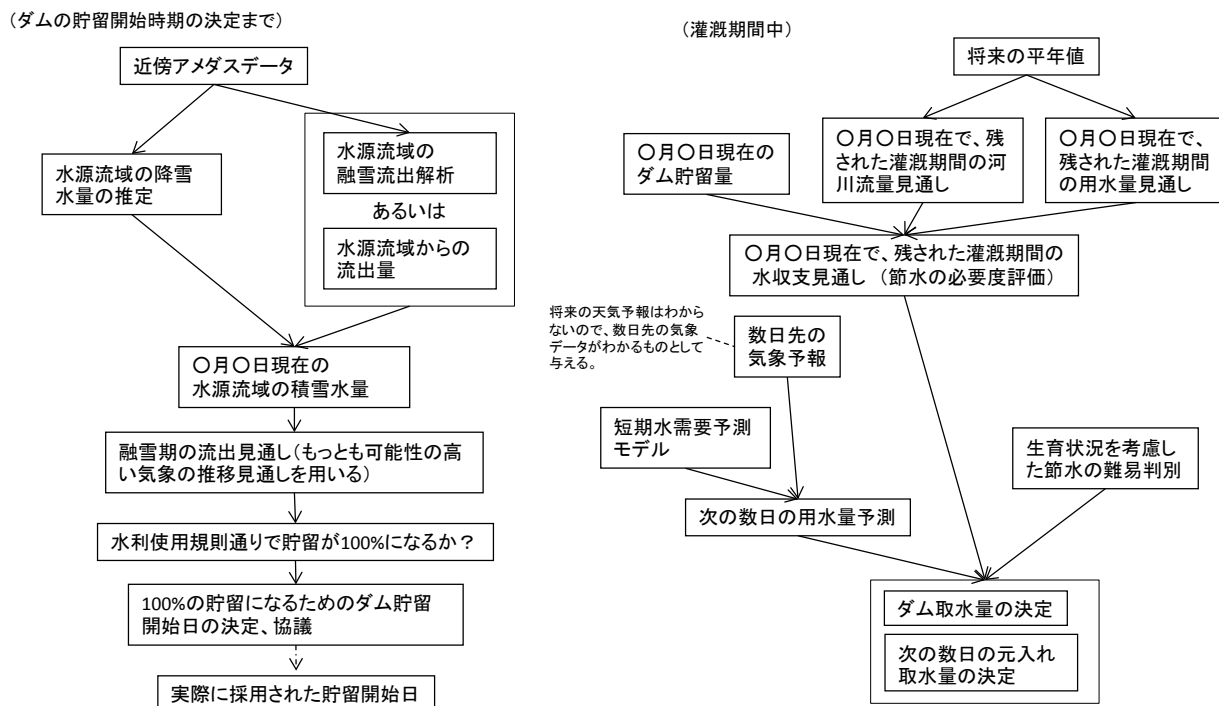


図-29 積雪水量の減少や融雪の早期化が予測される条件下での水管理の方針決定手順の概要

水管理方針決定のために、どの時期にどのような現況情報・予測情報を用いるかという枠組みを作成した。平成26年度には、マニュアル化に向けて、手順を構成する項目の具体的な作業内容のとりまとめを進めた。

### 6.2 結果

図-29に積雪水量の減少や融雪の早期化が予測される条件下での水管理の方針決定手順の概要を示す。図では、水管理を時期別に、①融雪期の貯水池管理、②灌漑期間中の貯水池管理・送水管理、に区分した。

たとえば、「ダム貯留開始時期の決定まで」の期間では、2章で述べた積雪水量の推定方法を活用して、融雪期の任意の月日現在の山地の積雪水量を推定し、満水にするためのダム貯留開始日を決定する。また、「灌漑期間中」の期間では、将来の気象予測値を用いて、任意の月日現在における「残された灌漑期間の河川流量見通し」と「残された灌漑期間の用水量見通し」を推定してその時点での節水の必要度を評価するとともに、生育状況や気象予報をもとに数日先までに必要となる用水量を予測し、当面のダムからの取水量を決定する。

27年度、28年度に、上記の個々の手順の具体的な内容を作成し、将来の気温・降水量を用いたシミュレーションによって、用水管理技術の適用性検証を行

う。

### 7. まとめ

本研究に関する平成23～26年度の成果は、次のようにまとめられる。

- 1) 北海道内の4カ所のダム流域と13カ所の河川流域を対象に、入手が容易な流域近傍のアメダスデータから流域の積雪水量を推定する手法を検討した。その結果、流域の積雪水量は、流域近傍の複数地点のアメダスデータから推定することで、精度良く推定できることがわかった。
- 2) 9種の気候モデルの予測値を用いて、気候変動が農業用水の需要と供給に与える影響を検討した。その結果、空知地域と上川地域では、融雪ピーク日は全モデルで早期化することや、融雪期および灌漑期の総流出量は多くのモデルで減少することがわかった。このため、水利施設間の連携による水管理を検討する必要がある。
- 3) 気象条件の短期的な変化が水需要に与える影響については、2種類の気候モデルを用いて、農業に関わる気象項目の将来予測値を整理した。また、短期的な気温の変化に対する圃場の

水需要の変化をモデル化するために、水稻3品種に対して生育時期の予測式を作成し、近年と将来の生育時期を比較した。その結果、生育時期が早期化することや早期化の程度を確認した。

- 4) 将来積雪寒冷地で強まると予想される渇水状況下で、気温の低下が予報された場合、水田水温を確保するためには、湛水深の管理が重要であり、その場合には取水時間帯が水田水温に与える影響は小さいことを検証した。
- 5) 積雪寒冷地における将来の気候変動下での農業用水管理技術の開発を目的として、積雪水量の減少や融雪の早期化が予測される条件下での水管理の方針決定手順の概要を作成した。

### 参考文献

- 1) 農林水産省：食料・農業・農村基本計画の評価資料、p.45、2010.3
- 2) 中村・多田・鶴木・齋藤・松岡：北海道内の水田灌漑用ダムにおける将来の水収支の試算、寒地土木研究所月報、No667、pp.12-19、2008.12
- 3) 中村・鶴木・多田・齋藤・臼谷：農業用ダム集水域における積雪水量推定手法、平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp.232-233、2010.8
- 4) 秀島・星：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、pp.11-17、1990.8
- 5) 農業水利研究会編：農業農村整備事業のための河川協議の実務、公共事業通信社、p.183、1999.3
- 6) 中村・伊藤・酒井・臼谷・吉田：アメダスデータを用いた流域の積雪水量の推定方法、農業農村工学会論文集、83、pp.II\_27-II\_33、2015.6
- 7) 道広・佐藤・鈴木：流域スケールの水文解析に向けたGCM出力の活用手法の検討、土木学会論文集B1（水工学）、Vol.68、No.3、pp.125-135、2012.9
- 8) 京都大学防災研究所水資源環境研究センター水文環境システム研究領域：水文解析のための気候変動情報データベース、（オンライン）、入手先<<http://hes.dpri.kyoto-u.ac.jp/database/index.html>>
- 9) 中村・伊藤・須藤・西・木山：流域の標高の違いが温暖化後の融雪流出に与える影響、農業農村工学会論文集、83、pp.I\_41-I\_48、2015.6
- 10) 北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場：北海道総合研究機構農業試験場資料第39号、p.15、2011.10
- 11) 猪股・竹内・深見：GCM降水量データのバイアス補正手法開発、土木技術資料、51-10、pp.10-13、2009.10
- 12) 森田・村上・竹川・小川・山崎・楠谷・森本：簡易有効積算気温による水稻栽培指標の設定、北農51、pp.1-11、1984.8
- 13) 堀江・中川：イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究、日本作物学会記事59(4)、pp.687-695、1990.12
- 14) IPCC第4次評価報告書政策決定者向け要約、p.2、2007
- 15) 大原・大槻・滝沢・丸山：水稻水田の熱収支とその水温推定方法—水田の水温と水管理に関する研究（I）—、農業土木学会論文集、119、pp.21-27、1985.10
- 16) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—、(株)朝倉書店、p.337、1996.9
- 17) 桑形：日平均水田水温モデル(簡易法)、農業環境技術研究所気象研究グループ、pp.1-7、2005.11
- 18) 大原・大槻・滝沢・丸山：水稻の生育に伴う水温変化とその推定—水田の水温と水管理に関する研究（II）—、農業土木学会論文集、123、pp.33-40、1986.6

## A STUDY ON AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT IN COLD SNOWY REGIONS UNDER THE INFLUENCE ON CLIMATE CHANGE

**Budgeted** : Grants for operating expenses General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Cold-Region Agricultural Development Research Group  
(Irrigation and Drainage Facilities Research Team)  
Director for Cold-Region Technology Development Coordination  
(Cold-Region Technology Promotion Division)

**Author** : NAKAMURA Kazumasa

SUTO Yuji

KOHIYAMA Masayuki

SAKAI Miki

ITO Nobuo

KOSHIYAMA Naoko

NAKAYA Toshikatsu

ISHII Kuniyuki

HOSOKAWA Hiroaki

NAGAHATA Masahiro

**Abstract** : With the assumption that climate change in snowy cold regions will occur, this study outlined here was conducted to develop technologies for irrigation water management that enables effective use of water resources. The outcomes of the study in FY 2011 and 2014 are as described below.

- 1) By using data on four agricultural dams and 13 rivers in Hokkaido that was collected over a period of 11 years, a method was developed for estimating snow water equivalent in catchment basins from multiple data collected in nearby areas by AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System). In FY 2013, a rational method was developed for determining the two coefficients required for the estimation. The estimation procedure was organized, and a manual was prepared.
- 2) In the Sorachi and Kamikawa regions, for tributaries each having multiple water facilities, the effect of climate change on agricultural water supply and demand was clarified with the use of nine climate models. It was predicted that, in basin areas with dams or head works, decreases in snow water equivalent would cause decreases in the runoff during the snowmelt season and the irrigation season and would cause the early arrival of snowmelt season. The number of days with the peak day of snowmelt runoff occurring earlier was small when the elevations of the basin include the middle and high elevations (from 100 m to 1800 m) and when the variation in elevations in the basin is small. The decrease in runoff during the snowmelt season (February to May) and during the irrigation period (May to August) tended to be small in the basin whose average elevation is high.
- 3) A growth prediction equation was created for three varieties of paddy rice based on cultivation records, and the changes in the growth period for the three varieties were predicted by using the meteorological values predicted by 9 climate models for the distant future. It was predicted that the time required for growth from transplanting or seeding to the maturing period will decrease because of global warming. The maturing period was predicted to be shifted 4 to 13 days earlier.
- 4) A paddy field water management method that prevents decreases in water temperature and soil temperature in paddy fields was considered through simulation under conditions of drought, which is expected to increase in frequency in the future. It was verified that, during a period when water saving is required but water intake during the ideal time (e.g., early morning or nighttime) is difficult, maintaining a relatively great depth of ponding is effective as a measure against cool weather when low temperatures are forecast with a lead time of a few days.

5) Procedures necessary for determining policies are described, with respect to reservoir management during the snowmelt season and reservoir management and water supply management during the irrigation season, in view of climate change.

**Keywords** : climate change, snow water equivalent, water temperature, compound type canal, agricultural dam