

地域別に見た気候変動に対する積雪水資源脆弱性

REGIONAL VULNERABILITY OF SNOW WATER RESOURCE IN CLIMATE CHANGE

那須貴之¹・風間聡²・沢本正樹³

Takayuki NASU, So KAZAMA and Masaki SAWAMOTO

¹学生員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²正会員 博(工) 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

³フェロー 博(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

Snow water equivalent (SWE) distribution in time series was acquired from SWE model with AMeDAS data, remote sensing data, and elevation data. The SWE model was composed of the snowfall model and the snowmelt model. The snowfall distribution was presumed using the weighted average distance method with AMeDAS data in the snowfall model. The snowmelt was estimated using the degree-day method in the snowmelt model. The snowmelt rate factor was decided by comparing the snow map with SWE distribution. To discuss the regional vulnerability of snow water resource, difference between SWEs of the little snow year and the heavy one was estimated. As results, the difference was 1000mm and over in Yamagata, Niigata, Toyama and its surroundings, which were considered as vulnerable region of SWE in Japan.

Key Words : *vulnerability, AMeDAS, JAIDAS, Degree-day method, snowmelt rate factor*

1. はじめに

日本の平均降水量は世界年平均降水量 (973mm)を上回る約1700mm¹⁾であり、日本は世界的に見ると水が豊かな国といえる。しかし、河川の流量は一年を通じて変動が大きく、年間を通して水供給は十分でなく、安定した水供給は日本における重要な課題となっている。また、近年の地球規模での温暖化による積雪および融雪の変化による水資源への影響も懸念される。その中で、冬の間貯留された積雪は安定した水供給の重要な水資源となる。一方、積雪は雪崩など悪影響をもたらす要因にもなる。

多雪年である1999-2000年の冬には全国で多数の雪害が発生している。北海道帯広市では、1月の時点で平年の4倍もの積雪量が観測されている²⁾。市の雪害対策費二億八千万円が底をつき雪害対策が後手に回ってしまい、住民の生活に多大な影響をもたらした。山形県米沢地方では過去10年間の記録を更新する大雪となり、3月の時点での累計の降雪量は670cmを超えた³⁾。除雪費は予算である三億五千万円を超え赤字となった。雪に埋もれた果樹の枝が沈む雪に引っ張られて折れるといった、農作物への被害が相次いだ。山口県では1月下旬に降った大

雪により農林、水産に被害が発生した。農林関係では、雪の重みによるビニールハウスの倒壊などにより約二億七千四百万円の被害、水産関係では漁船が沈没するなどの被害により約千八百万円の損害があったと報告されている⁴⁾。

多雪による災害に比べると報告数は少ないものの、少雪による災害の報告もある。北海道東部において少雪が原因でトドマツの大規模な枯損被害が発生したと報告されている。また、平成14年には広瀬川で少雪の為に灌漑期に瀬枯れが生じている。

このように広域において積雪による被害が多発する事は珍しくない。この積雪を水資源として高度利用するとともに、雪氷災害を最小限にとどめる為に、日本全体という広域スケールにおいて積雪・融雪情報を整備することが必要である。

広域積雪観測においてリモートセンシング技術はきわめて有効であり、多くの研究で利用されてきている。これまで戸塚ら⁵⁾、泉ら⁶⁾は衛星データ、標高データ、気象データを用いて日本全域における積雪分布を時系列で推定および評価してきた。また、Molotchら⁷⁾は融雪期を対象としてAVHRR等から積雪面積情報を作成し、それを利用してdegree-day法により積雪水量推定モデルを提案し、面積35100km²の流域に適用してモデルの適用性

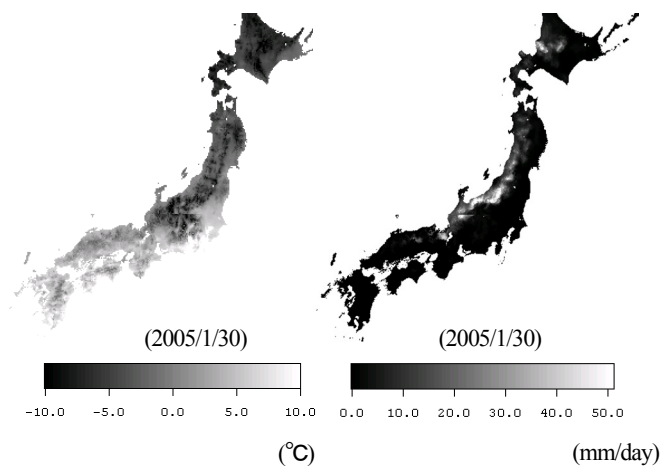


図-1 気温分布

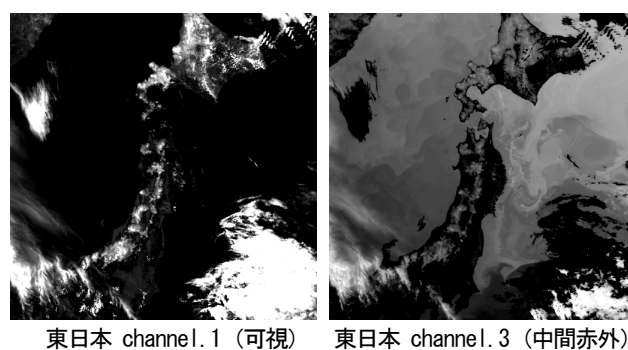


図-2 降雪量分布

が高いことを示している。しかし、これらの研究では積雪水量の把握のみにとどまっており、暖冬・厳冬といった冬季における気候の変化が積雪水量にどのような影響を与えているのか、またその積雪水量の変動が社会に与える影響はどの程度なのかという事については議論されていない。

年度によって積雪水量が大きく変動するような地域では、積雪を水資源として活用することは困難である。そこで本研究では、積雪が多い年、少ない年、平年並みである年における全日本での積雪水量分布を推定し、それらを比較することで雪水資源の脆弱性のある地域について考察することを目的とする。

2. データセットおよび対象地域・期間

研究対象地域は日本全域である。衛星データは、NOAAのデータベースの一つであるJAIDASの東日本および西日本の画像を用いた。標高データは国土地理院が作成した数値地図情報の250m×250mの空間分解能をJAIDASの1100m×1100mの分解能に平均化して用いた。数値地図情報とJAIDASそれぞれの経緯度情報を用いて、JAIDASのセルの経緯度計測点に最も近い国土数値情報のセルを求め、その周辺25個のセルの標高値を平均してJAIDASのセルの標高値を求めた。気象データは、気象庁より提供されているAMeDASデータから日平均気温(°C)と日降水量(mm)を用いた。また、研究対象期間は1992年12月～1993年5月、1998年12月～1999年5月、1999年12月～2000年5月、2004年12月～2005年5月の計4年間である。仙台管区気象台の発表によると冬の降雪量平年比について、1992-93年は66%で低い年、1998-99年は95%で平年並み、1999-2000年は100%で平年並み、2004-05年は99%で平年並みであった⁸⁾。広島地方気象台の発表によると冬の降雪量平年比について1992-93年は50%で低い年、1998-99年は80%で平年並み、1999-

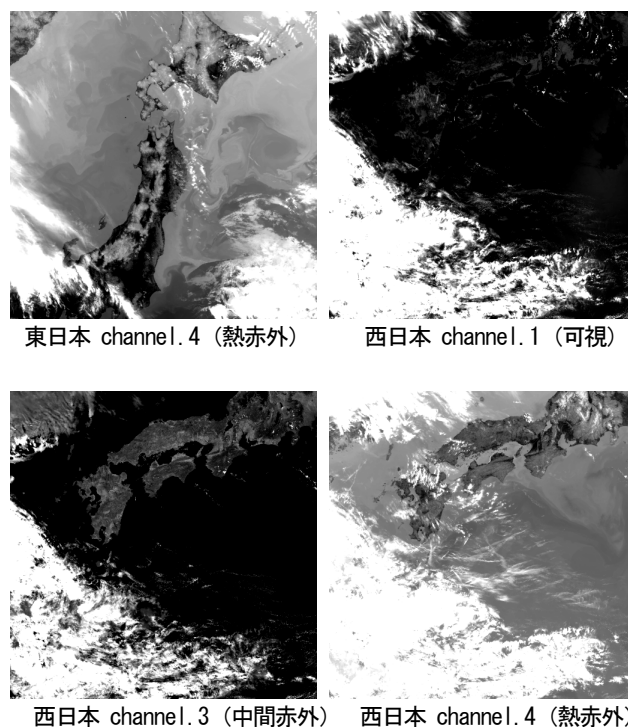


図-3 JAIDAS画像 (2005/4/19)

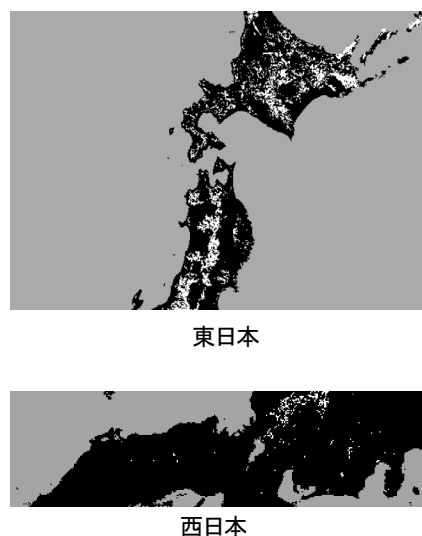


図-4 積雪マップ (2005/4/19)

表-1 融雪係数

月	東日本				西日本			
	92/93(少雪)	98/99(通常年)	99/00(多雪)	04/05(通常年)	92/93(少雪)	98/99(通常年)	99/00(多雪)	04/05(通常年)
12	2	4	3	4	0.3	4	4	1
1	1	4	5	4	2	5	9	3
2	1	4	4	6	4	6	4	1
3	2	4	4	6	3	5	8	2
4	0.5	3.5	1.5	4	0.5	5	4	1
5	0.5	—	—	1	0.5	—	—	1

2000年は170%で高い年，2004-05年は60%で低い年であった⁹⁾．このことから，1992-93年は少雪年，1998-99年，2004-05年は平年，1999-2000年は多雪年とする．

3. 解析方法

(1) SWEモデル

積雪水量の推定は泉ら⁵⁾ にならいSWEモデルを用いる．SWEモデルは降雪モデルと融雪モデルから構成され式(1)のように示される．

$$\frac{d}{dt}(SWE) = SF - SM \quad (1)$$

ここで， SWE は積雪水量 (mm)， SF は降雪量(mm/day)， SM は融雪量 (mm/day)である．

(2) 降雪モデル

各セルの気温はAMeDASデータの日平均気温を重み付距離平均法により補間して求め，標高データを用いて気温減率 $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ により補正することによって気温分布を作成した(図-1)．各セルの降雪量は，降水形態の判別気温 2°C ¹⁰⁾を用い， 2°C 以下を降雪としてAMeDASの降水量データを重み付距離平均法により補間して求めた．その際に近藤ら¹¹⁾ にならい式(2)を用いて標高補正を行った(図-2)．

$$SF = SF' \times \{1 + 0.001 \times (E_m - E_p)\} \quad (2)$$

ここで， SF は標高補正をした降雪量(mm)， SF' はAMeDAS観測点降水量データ(mm)， E_m はセルの標高(m)， E_p は観測点の標高(m)である．0.001は補正係数であり，気温 2°C 以下を降雪としている条件下において，暖地・寒地ともに適用できる¹¹⁾．

(3) 融雪モデル

各セルの融雪量は式(3)に示すようにdegree-day法により計算した．

$$SM = K \times T \quad (3)$$

ここで， SM は日融雪量 (mm)， K は融雪係数

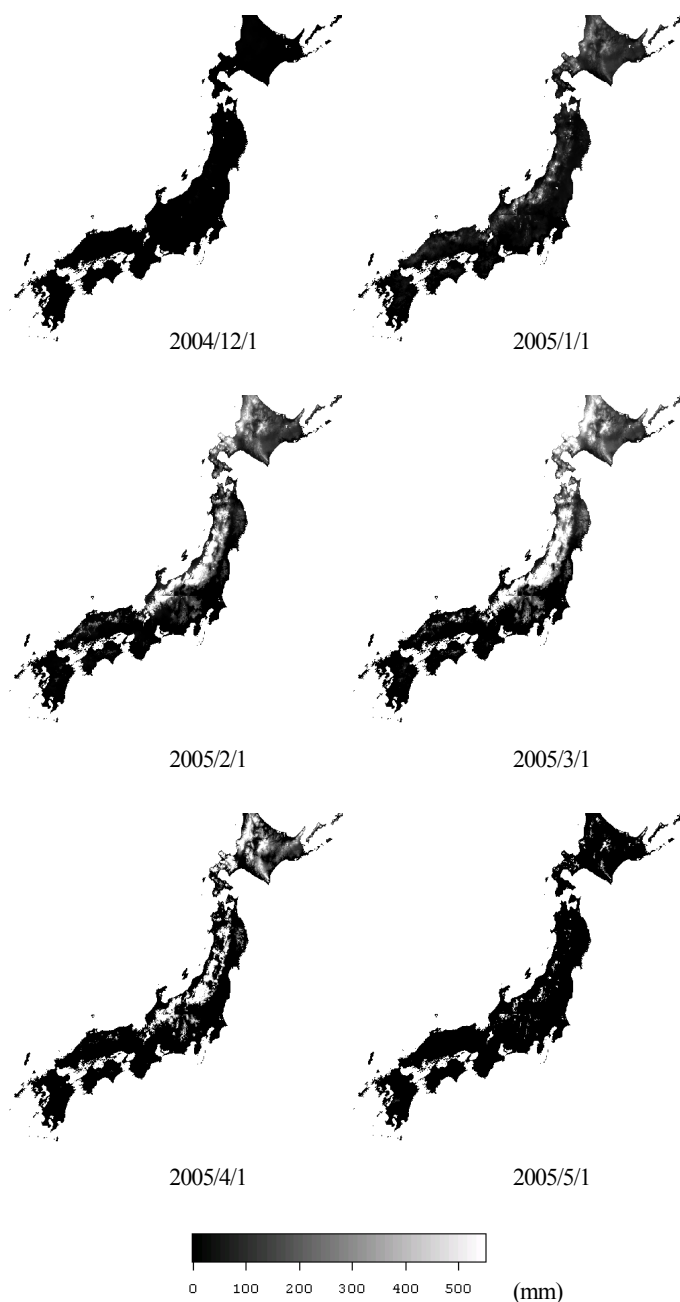


図-5 積雪水量分布

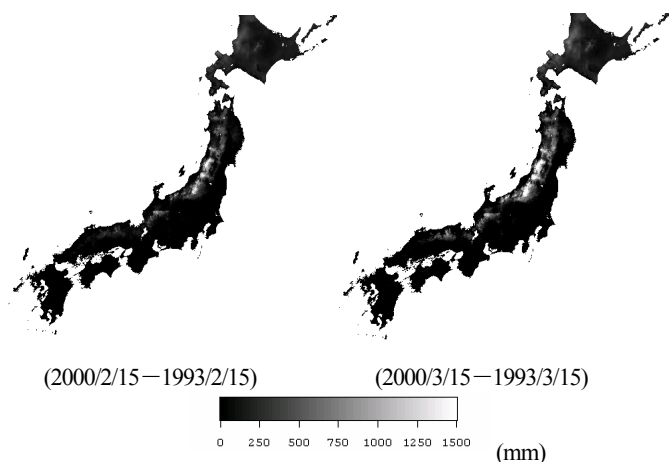


図-6 積雪水量差 (多雪一少雪)

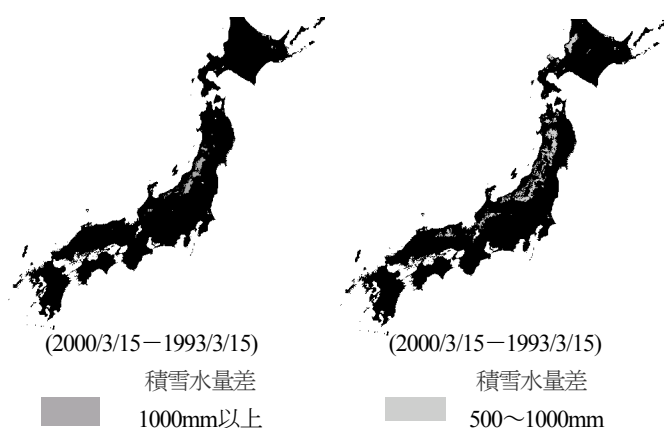


図-7 積雪水量差が大きい地域 (多雪一少雪)

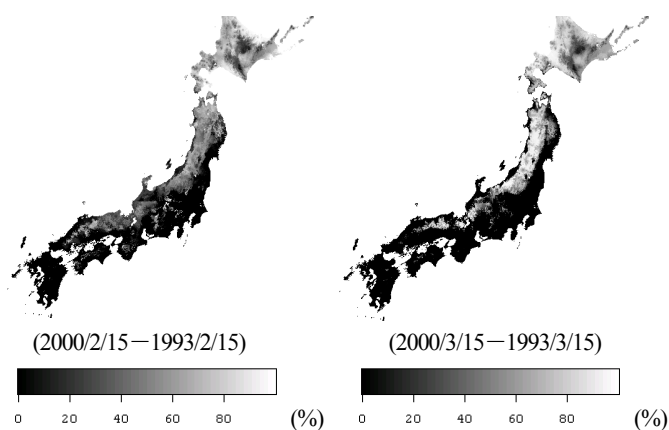


図-8 積雪水量最大値に対する積雪水量差の割合 (多雪一少雪)

(mm/day/°C), T は0°C以上の日平均気温 (°C)である。

(4) 融雪係数の決定

融雪係数を変化させ求まるSWEモデルの積雪域とJAIDAS画像から作成した積雪マップにおける積雪域を

比較し、最も相関が高い際に得られたものを融雪係数とした。つまり、様々な融雪係数を式(3)に代入し、最適な融雪係数を求めた。

(5) 積雪マップの作成

積雪マップは東日本、西日本のJAIDAS画像のch1,3,4 (可視域(0.58~0.63 μ m), 中間赤外域(3.55~3.93 μ m), 熱赤外域(10.3~11.3 μ m))を用いて作成した(図-3)。まずch1で目視により雲または雪の部分判定し、次に標高データを用い、気温減率(0.6°C/100m)による標高補正をch4の輝度温度に対して行い、氷で形成されている高層の雲を判定した。そして、ch3の中間赤外の波長域が大気中の水粒に強く反射する性質から低層の雲を判定した。このようにして雲域を除去し、積雪マップを作成した。作成した東日本および西日本の積雪マップを図-4に示す。任意の融雪係数の値を代入して作成した積雪水量分布と、月毎に作成した積雪マップを比較し、最も一致率が高い場合の融雪係数を採用した。求めた融雪係数を表-1に示す。

(6) 積雪水量分布の作成

東日本、西日本の2ヶ所において月毎に求めた融雪係数を用いて積雪水量分布を作成した。また、それを合成することで全日本における日単位の積雪水量分布を作成した(図-5)。

4. 結果と考察

(1) 積雪水量の比較

年によって積雪水量の変動が大きい地域は、積雪による水供給が不安定であり、水資源に対し脆弱な地域と考えることができる。そこで、少雪年(1992-93年)の積雪水量と通常年(1998-99年)の積雪水量の差、同様に多雪年(1999-2000年)ー通常年(1998-99年), 通常年(2004-05年)ー通常年(1998-99年), 多雪年(1999-2000年)ー少雪年(1992-93年)の差の4種類の差について比較を行った(図-6)。比較を行う日は、降雪期の終わりである2月15日、融雪量が降雪量を上回る時期である3月15日の2日間である。

4種類の比較の中で、積雪水量差が最も大きくなると考えられる多雪年一少雪年についてみると、山形県、新潟県、富山県にかけて積雪水量差が1000mm以上と非常に大きな値を示している。また東北地方日本海側から中部地方北部にかけての広い範囲で積雪水量差500~1000mmと大きな値を示した(図-7)。これは他の比較でも同様の傾向が見られた。

さらに、積雪水量の差が積雪量に対してどの程度の割合を占めるのか把握するため、研究対象期間である4年間で最も大きい積雪水量の値を各セルで求め、この値に対する積雪水量差の割合を求めた(図-8)。この値が大き

表-2 積雪水量

		積雪水量(m ³)	作付面積(km ²)	作付面積当たりの積雪水量(m ³ /m ²)	1灌漑期間中に水田に必要な用水量との比
最上川	少雪	8.83×10^8	717 (山形県)	1.23	0.82
	多雪	32.0×10^8		4.46	2.97
北上川	少雪	0.96×10^8	795 (宮城県)	0.12	0.08
	多雪	4.05×10^8		0.51	0.33
信濃川	少雪	32.1×10^8	1210 (新潟県)	2.65	1.76
	多雪	78.5×10^8		6.49	4.32

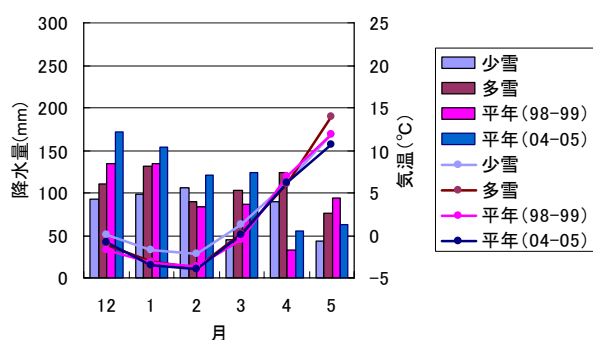


図-9 気温、降水量の推移（札幌）

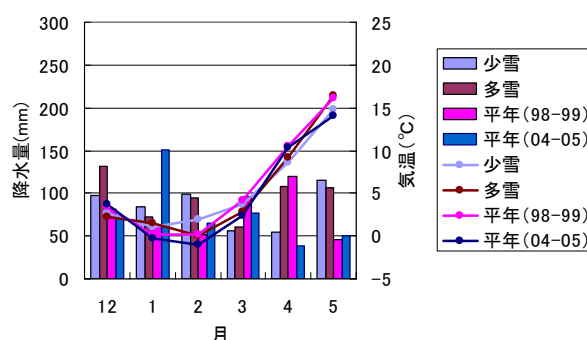


図-10 気温、降水量の推移（山形）

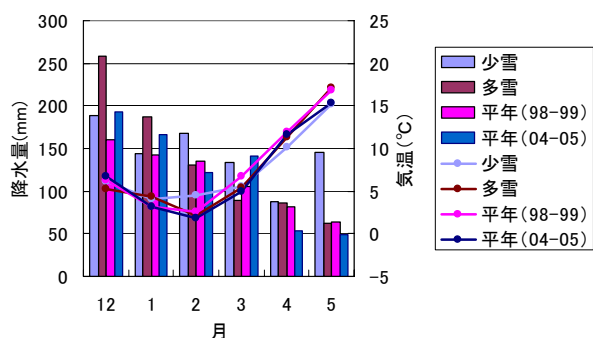


図-11 気温、降水量の推移（新潟）

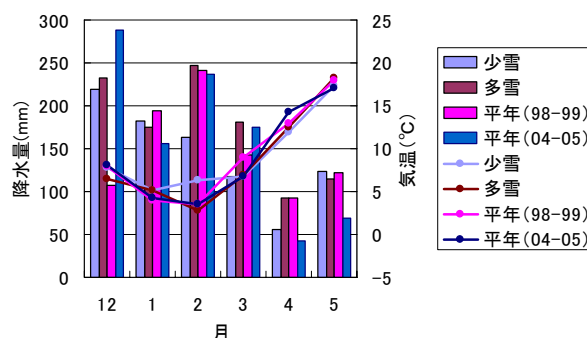


図-12 気温、降水量の推移（鳥取）

い、つまり積雪量に対し積雪水量差の占める割合が大きい地域は、多雪・少雪の年によって積雪水量の変化が大きく、水資源としての積雪水量が不安定であり、より水資源に対し脆弱であると考えられる。2月の時点では北海道の北東部、南西部で90%以上の高い値を示す地域が見られた。3月に入ると90%以上の値を示す地域が東北地方日本海側でも見られる。また、近畿地方の北部にも90%を超える地域がある。

しかし、標高が低い所など、もともと積雪量が少ない地域では多雪・少雪年での積雪水量の変動がわずかであっても積雪水量最大値に対する積雪水量差の割合は高い値を示してしまう。よって、積雪水量差、積雪水量最大値に対する積雪水量差の割合、この2つでともに高い値を示す東北地方日本海側が最も雪水資源に対し脆弱な地域である。さらに、融雪量が降雪量を上回る3月には

脆弱性がさらに増すことが分かる。

(2) 気温、降水量の検証

気候の変化が積雪水量にどのように影響するか把握するため、多雪年、少雪年、平年における気温、降水量の比較を行った。検証対象地域は北から札幌、山形、新潟、鳥取の4地点である。各年度における気温、降水量の推移を図-9～図-12に示す。

少雪年について見てみると、全ての地点において降雪期の気温が平年に比べ高いことが分かる。札幌では12～3月にかけて0.9～1.8℃、山形では1～2月にかけて1.0～3.0℃、新潟では1～2月にかけて1.0～2.6℃、鳥取では1～2月にかけて0.9～2.7℃平年に比べ高い。一方、融雪期である3月以降は札幌の3月を除き全ての地点で気温が平年に比べ約1℃低い。降水量は、札幌ではほと

んどの月で平年より小さいが、山形、新潟では平年を大きく下回るような月は見られない。また、3ヵ所とも2月の降水量は多雪年を上回る値を記録している。一方、鳥取では2月の降水量は平年に比べ60mmも少ない。以上のことから、降雪期に平年より気温が高くなり融雪が進行したため、1992-93年は少雪年と考えられる。

次に多雪年について見てみる。札幌では4月、山形、新潟では12月、平年に比べ50mmも降水量が多いことが分かる。その他の月の降水量はほぼ平年並みである。札幌の気温は融雪期、降雪期を通じてほぼ平年並みである。山形、新潟、札幌では12月の気温が平年より約1℃低く、1月以降では平年より気温が低い月は見られない。以上のことから、山形、新潟、鳥取では12月に多くの雪が降り、また気温が低く融雪が進行しない為、結果として1999-2000年は多雪年と考えられる。札幌については気温、降水量の推移からは多雪となる要因が見られなかった。

以上をまとめると、多雪・少雪の差が明確になるのは降水量よりも降雪期の気温による影響が大きいと言える。

(3) 流域毎の積雪水量の比較

流域毎に積雪水量の総計を求め、少雪年と多雪年における作付面積¹²⁾当たりの積雪水量の比較を行った(表-2)。検証対称は最上川、北上川、信濃川の3つの流域である。それぞれの河川の流域には水田地帯が広がり、冬の間に貯留された積雪は農業用水として非常に重要な役割を持つ。

全ての流域において、多雪年の作付面積当たりの積雪水量は少雪年の場合の倍以上の値を示した。北上川は太平洋側にあり積雪水量総計の値が低いため、多雪年においても作付面積当たりの積雪水量は小さな値となっている。

水稻の一般灌水普通栽培において、1灌漑期間中に水田に必要とされる用水量は1m²あたり1.5m³である¹³⁾。これと作付面積当たりの積雪水量との比較を行う。信濃川では少雪・多雪年ともに積雪によって十分な農業用水を得られることが分かる。最上川では少雪年において積雪のみから農業用水を確保することは困難であることが分かる。北上川では少雪・多雪年ともに農業用水に用いるほど十分な量の水を積雪からは得られない。しかし一方で信濃川、最上川では農業用水を積雪に依存していると考えられる。これら太平洋側にある河川の流域では、将来、温暖化により融雪の量・時期が変化することで、代掻きの時期に十分な農業用水が得られないといった問題が発生する可能性がある。

5. まとめ

本研究では、衛星データ、数値地図情報、AMeDAS

データから、多雪年、少雪年、平年における日単位の積雪水量分布を推定し、積雪水量の比較を行った。その結果から得られた結論を以下に示す。

- ・山形県、新潟県、富山県には積雪水量差が1000mmを超える地域が広がり、これらの地域は気候変動による影響を受けやすく、雪水資源に対し脆弱である。
- ・2月までの降雪期から3月以降の融雪期へ変わる時期には積雪水量の変化が大きく、脆弱性が高くなる。
- ・1992-93年は、降雪期に平年より気温が約1～3℃高くなり融雪が進行したため少雪年となった。
- ・1999-2000年は、12月に多くの雪が降り、また降雪期に平年より気温が約1℃低く融雪が進行しなかったため多雪年となった。
- ・信濃川、最上川流域では将来、温暖化により融雪の量・時期が変化することで、代掻きの時期に十分な農業用水が得られないといった問題が発生する可能性がある。

謝辞：本研究を進めるにあたり地球環境研究総合推進費から援助を受けました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 独立行政法人 国際協力機構：世界の諸問題，JICAホームページ，
URL：http://www.jica.go.jp/world/issues/kankyoku05.html
- 2) 朝日新聞：朝刊，2000年1月13日。
- 3) 朝日新聞：朝刊，2000年3月14日。
- 4) 朝日新聞：朝刊，2000年2月3日。
- 5) 戸塚岳大・風間聡・朝岡良浩・沢本正樹：積雪モデルと衛星積雪面情報を用いた東北地方の積雪分布と融雪係数の解析，水文・水資源学会誌，vol. 17，pp. 493-502，no. 5，2004。
- 6) 泉宏和・風間聡・戸塚岳大・沢本正樹：全日本の積雪水量、積雪深、全層積雪密度分布推定，水工学論文集，第49巻，(1)，pp. 301-306，2005。
- 7) N.P.Molotch, S.R.Fessnacht, R.C.Bales, S.R.Helfrich：Estimating the distribution of snow water equivalent and snow extent beneath cloud cover in the Salt-Verde River basin, Arizona, *Hydrological Processes*, 18, pp. 1595-1611, 2004。
- 8) 仙台管区气象台：東北地方 寒候期予報，2005。
- 9) 広島地方气象台：中国地方 寒候期予報，2005。
- 10) 塚本良則：森林の水文学，文永堂出版，pp. 195，1992。
- 11) 近藤純正・木谷研・松島大：新バケツモデルを用いた流域の土壌水分量，流出量，積雪水当量，及び河川水温の研究，天気，vol.42，pp. 821-831，1995。
- 12) 農林水産省大臣官房統計部：平成17年産水稻の作付面積及び予想収穫量，農林水産統計，pp. 6，2005。
- 13) 地人書館：農業用水資源，水利学大系，第4巻，pp. 140，1962。

(2006. 9. 30受付)