

中部山岳地域における融雪流出特性の標高依存性

山 中 勤* 脇山 義史* 鈴木 啓助**

Elevation Dependence of Snowmelt Runoff Characteristics in the Japanese Alps Region

Tsutomu YAMANAKA*, Yoshifumi WAKIYAMA* and Keisuke SUZUKI**

[Received 10 October, 2012; Accepted 17 January, 2013]

Abstract

Observed discharge data covering the last three decades (1980–2009) at 16 rivers (i.e., rivers of Ida, Jinzu, Kurobe, Hime, Seki, Sai, Chikuma, Shinano, Uono, Kiso, Tenryu, Keta, Oi, Kamanashi, Fuefuki, and Fuji) in the Japanese Alps region are analyzed to clarify the elevation dependence of runoff characteristics during the snowmelt season. In the Hokuriku area, where large quantities of snow fall, the center time (CT) of snowmelt runoff tends to be delayed more at rivers with higher catchment-mean-elevations. In addition, the long-term (1980–2009) trend of a forward shift of snowmelt runoff timing becomes more remarkable at rivers in this area, with the exception of Hime River, as catchment-mean-elevation increases. However, the correlation between flowering dates of cherry trees and snowmelt runoff timing is stronger at rivers in the area with a lower catchment-mean-elevation. Consequently, snowmelt runoff at lower elevations in the Hokuriku area is sensitive to year-to-year fluctuations of spring onset, while progressive warming has greater impacts on snowmelt runoff timing at higher elevations, not only in winter to early spring but also in winter to late spring or summer. On the other hand, elevation dependence of snowmelt runoff timing is not detected at rivers in other areas; the runoff characteristics described above are neither clear nor statistically significant at both lower and higher elevations. Our results prove that the hydrological response to global warming is elevation dependent in a snow-dominated region, providing important knowledge for better water-resource management and flood control.

Key words : snowmelt runoff, river discharge, climatic change, Japanese Alps region, mountain hydrology

キーワード : 融雪流出, 河川流量, 気候変動, 中部山岳地域, 山岳水文

I. はじめに

地球温暖化に対する水文過程の変化として重要視されているものの一つに融雪流出の早期化があ

げられる (Barnett *et al.*, 2005; Parry *et al.*, 2007)。例えば, シエラネバダ山脈やロッキー山脈を包含するアメリカ合衆国西部では, 融雪流出の早期化がすでにはじまっていることが河川流量の観測

* 筑波大学生命環境系

** 信州大学山岳科学総合研究所

* Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, 305-8577, Japan

** Institute of Mountain Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan

データにより確認されている (Aguado *et al.*, 1992; Dettinger and Cayan, 1995; Stewart *et al.*, 2004, 2005; McCabe and Clark, 2005)。またヨーロッパアルプスでも、同様の変化が起こりうるのが気候・水文モデルを用いた研究によって予測されている (Middelkoop *et al.*, 2001; Etchevers *et al.*, 2002; Zierl and Bugmann, 2005)。こうした水文循環の変化は、冬季から春季にかけての洪水リスクを上昇させる一方で、夏季の渇水をもたらす危険性がある (Middelkoop *et al.*, 2001)。山岳地域は、天然の水甕あるいは“water tower” (Viviroli *et al.*, 2007) とも例えられるように水源地域としての重要性をもち、そこでの環境変動の影響は下流に位置する人口稠密地域にまで及ぶ。加えて、温暖化影響の早期検出が可能である (Diaz *et al.*, 2003; Beniston, 2003) との期待もあり、環境変動モニタリングの意義がとくに大きいといえる。

わが国屈指の高山を擁する中部山岳地域でも同様の変化が予想されており、いくつかの事例研究がなされてきた。Wada *et al.* (2004) は黒部ダム流入河川の冬季流量が冬季気温の上昇とともに近年増加してきていることを報告した。Shinohara *et al.* (2009) は同じ河川を対象として、冬季の温暖化が春季流量の増加と夏季流量の減少をもたらすことを簡略化された水文モデルを用いて示した。こうした研究を踏まえて、Yamanaka *et al.* (2012) は中部山岳地域の主要 15 河川を対象に、河川流量観測データを用いて融雪流出時期の経年変動を解析した。その結果、日本海側もしくはその近辺に流域をもつ河川では冬季気温の上昇に伴う融雪流出の早期化が顕著であり、神通川と黒部川では 10 年あたり約 5 日のペースで融雪流出時期の重心となる日付 (center time; CT) がより早い方向にシフトしていることが示された。融雪流出時期と冬季気温の相関は木曾川や天竜川など中部山岳地域南西部の河川でも認められたが、北部の河川ほど顕著ではなく、融雪流出時期に対する冬季降水量の影響も大きかった。他方、信濃川上流の千曲川・犀川および富士川など内陸あるいは南東部の河川では冬季気温の影響はほとんどみられず、融雪流出時期の変化はほぼ降水量の変動に

よって規定されていた。こうした地域差は積雪の多寡におおむね対応しており、多雪地域においては融雪流出時期と桜開花日の年々変動が高い同調性を有することも明らかにされた。こうした流域ごとの融雪流出特性の差異は、日本海側・内陸・太平洋側といった水平的な位置関係だけでなく、流域の標高にも依存している可能性がある。しかしながら、この点については未解明のままである。

そこで本論文では、Yamanaka *et al.* (2012) で得られた知見を基礎としつつ、中部山岳地域における融雪流出特性の標高依存性を明らかにすることを目的とする。なお、ある時期の河川水がすべて融雪成分で構成されることは稀で、多かれ少なかれ降雨起源の水がつねに混在している。すなわち、融雪流出という用語は融雪成分を含む河川流出の意であり、純粋な融雪水の流出を意味するものではない。

II. 方 法

1) 研究対象地域とデータセット

本研究では、Yamanaka *et al.* (2012) が対象とした 15 河川に関川を加えた計 16 河川 (表 1, 図 1) を研究対象とする。関川を新たに加えた理由は、冬季気温の上昇に伴う融雪流出の変化が顕著な北陸における河川間の比較をより充実させるためである。用いたデータセットは雨量・流量年表データベース (日本河川協会, 2007) および水文水質データベース (国土交通省, 2012) であり、各河川 1 地点ずつ流量観測所を選び出し 1980 ~ 2009 年の日流量データを抽出した。また、計 9 か所の気象庁地上気象観測所 (地方気象台および特別地域気象観測所) における気象・生物季節観測データもあわせて使用した。

本来ならば気象庁の平年値統計にあわせて解析対象期間を 1981 ~ 2010 年の 30 年間とするのが理想的であるが、2010 年の流量データが公開されていない地点が多いため、上記期間を解析対象とした。流量観測所の選出にあたっては、長期にわたって欠測が少ないという条件を最も重視し、期間に差がない場合は上流側の地点を採用した。

表 1 研究対象河川.

Table 1 Summary of study rivers.

河川名	流量観測所	参照 地上気象 観測所	流域 面積 (km ²)	流域平均 標高 (m)	有効 観測年数 (年)
井田川	杉原橋	富山	250	726	27
神通川	大沢野大橋	高山	2065	1043	30
黒部川	宇奈月	富山	637	1707	25
姫川	山本	長野	698	1093	25
関川	高田	高田	703	698	30
犀川 [#]	陸郷	松本	2335	1231	30
千曲川 [#]	生田	長野	2036	1184	30
信濃川 [#]	岩沢	長野	8129	1036	30
魚野川	堀之内	高田	1408	631	30
木曽川	犬山	岐阜	4684	976	29
天竜川	宮ヶ瀬	飯田	2224	1258	27
気田川	犬居	飯田	317	701	24
大井川	神座	静岡	1160	1223	24
釜無川 [§]	船山橋	甲府	482	1227	27
笛吹川 [§]	桃林橋	甲府	916	927	29
富士川 [§]	北松野	甲府	3540	1022	28

[#] 信濃川の流域は犀川流域と千曲川流域を含む。

[§] 富士川の流域は釜無川流域と笛吹川流域を含む。

[#] Shinano basin includes Sai and Chikuma basins.

[§] Fuji basin includes Kamanashi and Fuefuki basins.

河川流量の値は、多数回の実測結果から求められた水位と流量の関係式を用いて、水位の自動観測値より算出される。このため、河川流量データの誤差としては、水位観測の誤差に加えて、水位-流量曲線の非正常性や不確実性に起因する誤差が含まれる。この誤差の程度は一概に評価できないが、高水流量など絶対量の議論を行う場合と異なり、季節変化特性を論じる際には深刻な影響は生じにくいと考えられる。

2) 融雪流出指標

日流量データをもとに、月平均日流出高およびCTを算出した。CTは流量で加重平均された日付を表し、次式で計算される (Stewart *et al.*, 2004, 2005)。

$$CT = \frac{\sum(t_i Q_i)}{\sum Q_i} \quad (1)$$

ここで、 t_i は水年のはじまりからの通算日数、 Q_i は*i*日目の流量である。本研究では、Yamanaka

et al. (2012)と同様に水年のはじまりを1月1日とし、梅雨や台風等による流量変化の影響を避けるため5月31日までのデータに限定してCTを算出した。この場合、CTの値は1月1日からの通算日数となるため、いわゆるDOY (day of year)として表現される。

融雪流出の時期を表す指標としてはほかに、春季最初の融雪流出イベントの生起日である“spring pulse onset date”などがあるが、流出パルスが融雪によるものか否かの認定が難しい場合があることや偶発的な降雨現象に左右されやすいといった欠点をもつ。一方、CTは融雪流出の開始や終了を厳密には反映していないが、偶発的要素に影響されにくい時間積分された情報をもつため、経年変化の解析に適している (Stewart *et al.*, 2005)。

3) 統計解析

長期トレンドの有意性は*t*検定ならびにMann-



図 1 研究対象河川の位置図.

Fig. 1 Location map of study rivers.

Kendall trend test (Westmacott and Burn, 1997) を用いて判定し、相関係数の有意性は t 検定によって判定した。

III. 結果と考察

1) 河川流量の季節変化パターン

まず、融雪期と他の季節の河川流出量を比較するため、全 16 河川の各月の流出高（単位面積あたりの流出量を水柱高として表したものを箱ひげ図として示す（図 2）。日本海に流れる河川（井田川・神通川・黒部川・姫川・関川および信濃川（上流部は千曲川）とその支流（犀川・魚野川））についてみると、2 月から 4 月にかけての顕著な流量増加がいずれの河川についても認められる。しかし、5 月の流量の落ち込みは井田川（図 2a）でとくに大きく、神通川（図 2b）・関川（図 2e）・魚野川（図 2i）では相対的に小さい。また、

姫川（図 2d）では 4 月と 5 月の流量がほぼ拮抗し、黒部川（図 2c）では 4 月よりも 5 月の流量が大きい年のほうが多い。黒部川は流量観測地点の上流に黒部ダムや宇奈月ダムなどを有しており、これらによる人為的な流量制御が流量の季節変化パターンに影響したとも考えられるが、本研究で対象とする河川のなかで流域平均標高が最も高い。流域平均標高が 2 番目に高い犀川（図 2f）も黒部川と類似した季節変化パターンを示し、標高による融雪流出時期の違いが示唆される。一方、犀川と同じく信濃川の上流にあたる千曲川（図 2g）では 5 月よりも 4 月の流量が大きい。また、信濃川下流（図 2h）では越後山脈あるいは日本海に近接した山地からの（魚野川と同様の流出特性を有すると予想される）支流の影響を強く受けるためか、4 月の流量がとくに大きくなっている。これらの河川の流量変化パターンは、春季（とくに 4 月）を中心として融雪水の寄与が大きいことを示唆する。

次に太平洋に流れる河川をみると、2 月から 4 月にかけての流量増加は同様に認められるものの、4 月の流量よりも夏季あるいは秋季の流量のほうが大きくなっている。木曾川（図 2j）・天竜川（図 2k）では 7 月に流量のピークがあり、ついで 9 月の流量が大きい。気田川（天竜川の支流）や大井川は年による変動が大きいものの、やはり 7 月から 9 月にかけての流量が年間で最も大きい。富士川（図 2p）とその上流にあたる釜無川（図 2n）・笛吹川（図 2o）は流出高の絶対値が千曲川・信濃川と同様に小さいが、季節変化パターンとしては他の太平洋側河川と同様で、秋季の比重がやや大きい傾向がある。すなわち、これらの地域では融雪水の寄与よりも降雨の寄与が大きいことを示唆する。

なお、すべての河川に共通した特徴として、年間を通じて冬季（12～2 月）の流量が最も小さく、とくに 1 月は年々の変動も小さいという傾向を指摘できる。わが国では水年の区切りを 4 月 1 日～3 月 31 日とすることが一般的であるが（市川, 1973）、少なくとも中部山岳地域の河川流量解析に関しては、暦どおり 1 月 1 日～12 月 31 日と

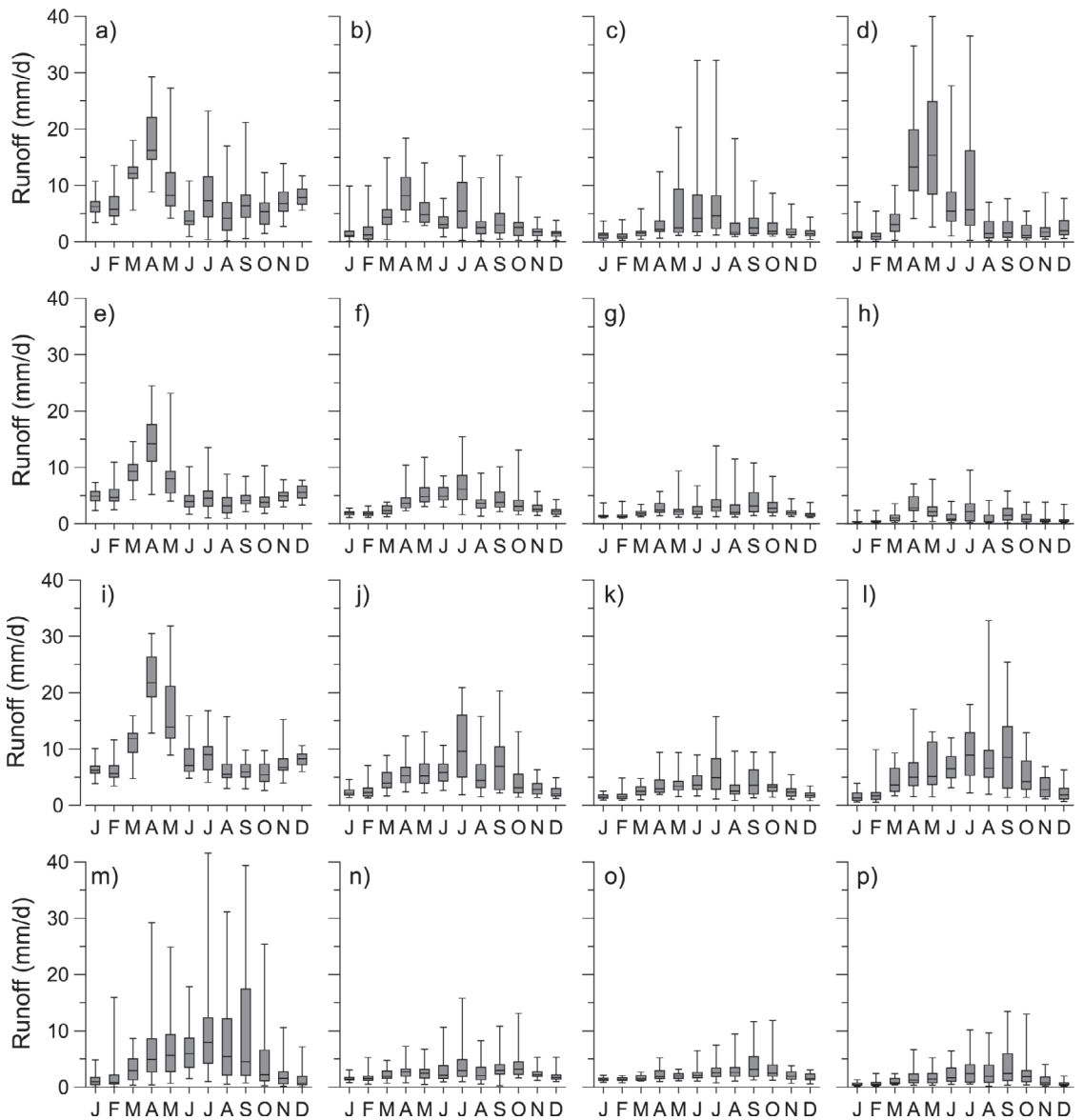


図 2 月平均日流出高の箱ひげ図。

a) 井田川, b) 神通川, c) 黒部川, d) 姫川, e) 関川, f) 犀川, g) 千曲川, h) 信濃川, i) 魚野川, j) 木曾川, k) 天竜川, l) 気田川, m) 大井川, n) 釜無川, o) 笛吹川, および p) 富士川。鉛直誤差線の上端・下端はそれぞれ 30 年間（ただし欠測期間は除く）の最大・最小を表し、灰色のボックスの中央線が中央値を示す。また、ボックスの上端と下端はそれぞれ上位 1/4 および下位 1/4 を表す。

Fig. 2 Box-Whisker plot of monthly mean daily runoff.

a) Ida River, b) Jinzu River, c) Kurobe River, d) Hime River, e) Seki River, f) Sai River, g) Chikuma River, h) Shinano River, i) Uono River, j) Kiso River, k) Tenryu River, l) Keta River, m) Oi River, n) Kamanashi River, o) Fuefuki River, and p) Fuji River. The caps of the vertical bars indicate maximum and minimum, and the line at the center of the box is the median. The box is defined by lower and upper quartiles.

したほうが適切であるように思われる。

図3に、各河川におけるCTの平年値（対象期間：1980～2009年）と流域平均標高の関係を示す。全体として、両者の間には弱い正の相関（相関係数 $r = 0.42$ ）があるが、北陸の河川（井田川・神通川・黒部川・姫川・関川・信濃川・魚野川）に限定するとこの相関はさらに強くなる（ $r = 0.77, p < 0.05$ ）。このことは、流域の標高が高くなるほど融雪流出時期が遅くなる傾向が、多雪地帯である北陸地方でとくに顕著であることを物語っている。きわめて大雑把な概算ではあるが、図3中の回帰直線の傾きから評価すると、標高が100 m高くなるごとに融雪流出の中心日は約2日遅くなる計算になる。

2) 流量・降水量・気温・融雪流出時期の長期変化トレンド

1月から5月にかけての各月平均流量の30年間長期トレンド解析結果を表2に示す。1月と2月の流量は千曲川・天竜川・大井川を除いて増加トレンドを示しており、なかでも神通川・黒部川・姫川・関川・信濃川・魚野川では統計的有意性が高い。増加量としては神通川・関川・魚野川がとくに大きく、月平均日流出高が10年あたり1 mm近く増加している。一方、4月の流量は姫川・犀川・笛吹川を除いて減少トレンドを示しており、井田川・黒部川・関川・魚野川・気田川で統計的有意性が高い。5月もおおむね同様の傾向が認められるが、3月は増加トレンドと減少トレンドが入り混じっている。減少トレンドが最も大きいのは黒部川の5月流量で、10年あたり約5 mmずつ日流出高が減少している計算になる。そのほかにも、井田川・関川・魚野川で4月流量の減少トレンドが2 mm/10年以上に及んでおり、気田川や大井川でも1 mm/10年以上である。しかしながら、姫川では逆に5月流量の増加トレンドがおよそ4 mm/10年に達しており、他の河川と著しい差をみせている。この原因は不明だが、6月や7月の流量も増加トレンドを示すことから、融雪プロセスとは異なる要因によって河川流量が増加してきていることを示唆する。したがって、長期トレンドの解釈にあたっては、姫川

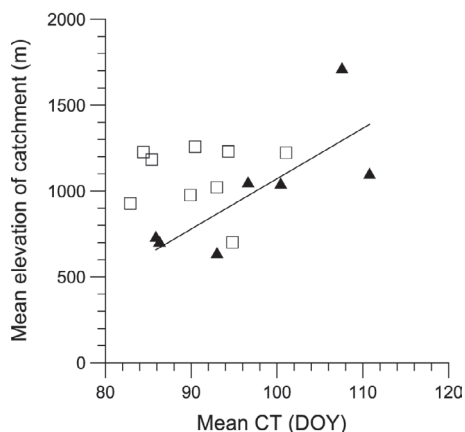


図3 各河川の平均CTと流域平均標高の関係（黒三角は北陸の河川、白抜き四角はそれ以外の河川をそれぞれ示す）。

Fig. 3 Relationship between long-term (1980-2009) mean CT and mean elevation of catchment. Solid triangle denotes rivers in the Hokuriku area, and open square denotes other rivers.

の特異性に留意する必要がある。

冬季流量の増加と春季流量の減少という経年トレンドは姫川を除く北陸の河川（すなわち井田川・神通川・黒部川・関川・魚野川・信濃川）でとくに明瞭である。しかしながら、冬季降水量の増加や春季降水量の減少といったトレンドは地点によっては認められるものの、統計的には有意でなく、また富山・高田といった日本海側の観測点では逆の傾向（すなわち1・2月の降水量の減少と4月の降水量の増加）が現れている（表3）。一方、気温は1～5月のいずれも上昇トレンドを示しており、とくに2月の気温上昇トレンドは対象としたすべての観測地点で統計的に有意である（表4）。したがって、北陸の河川にみられる冬季流量の増加と春季流量の減少というトレンドは降水量の変化によるものではなく、温暖化にともなって冬季の融雪流出が増加し、蓄雪量の減少によって春季融雪流出が減少したものと考えられる。

前述したように、Shinohara *et al.* (2009) は黒部川上流の黒部ダム流入河川を対象として、冬季の温暖化が春季流量の増加と夏季流量の減少をもたらすことを示した。これは、融雪流出の早期

表 2 月平均日流出高の長期トレンド (1980 ~ 2009).

Table 2 Long-term trend of monthly mean daily runoff (1980-2009).

河川名	1月	2月	3月	4月	5月
井田川	0.02	0.33	-0.51	-3.00**	-0.87
神通川	0.72 ^{‡*}	0.98 ^{†*}	0.95	-0.21	-0.14
黒部川	0.12	0.20 [†]	-0.16	-1.43**	-5.03 ^{‡***}
姫川	0.75 ^{‡*}	0.31	0.26	0.28	3.97 ^{‡*}
関川	0.06	0.14	-0.65	-2.96**	-0.98
犀川	0.03	0.06	0.08	0.16	0.48
千曲川	-0.01	-0.02	-0.13	-0.24	-0.26
信濃川	0.08	0.17 [†]	0.08	-0.64	-0.49
魚野川	0.46	0.87 ^{‡*}	0.92	-2.12*	-1.05
木曽川	0.00	0.06	-0.38	-0.72	-0.38
天竜川	-0.01	0.00	0.05	-0.19	0.13
気田川	0.04	0.13	0.18	-1.18 [†]	-0.88 [†]
大井川	0.05	-0.46	-0.30	-1.53	-1.44
釜無川	0.10	0.06	0.05	-0.07	0.20
笛吹川	0.11	0.09	-0.01	0.01	0.03
富士川	0.08	0.05	0.02	-0.57	-0.28

単位 (mm/日/10年)

有意水準: [†] $p < 0.05$, [‡] $p < 0.01$ (Mann-Kendall trend test), * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ (t -test).

Significance level: [†]for $p < 0.05$, [‡]for $p < 0.01$ in Mann-Kendall trend test, and *for $p < 0.05$, **for $p < 0.01$, ***for $p < 0.001$ in t -test.

表 3 月降水量の長期トレンド (1980 ~ 2009).

Table 3 Long-term trend of monthly precipitation (1980-2009).

観測所名	1月	2月	3月	4月	5月
富山	-12.6	-3.9	11.2	4.8	2.8
高山	14.0	3.2	2.0	-13.2	-10.9
長野	9.9	2.2	1.7	-2.5	-6.9
高田	-40.8	-15.3	9.8	1.4	-13.2
松本	10.6	-0.6	-6.1	-3.8	5.2
岐阜	7.7	0.6	-13.3	-24.3	-7.7
飯田	9.5	10.4	-2.4	-4.2	12.2
静岡	10.8	2.1	-11.9	-27.6	1.6
甲府	13.2	1.1	-15.4 ^{†*}	-2.2	6.3

単位 (mm/月/10年)

有意水準: [†] $p < 0.05$, [‡] $p < 0.01$ (Mann-Kendall trend test), * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ (t -test).

Significance level: [†]for $p < 0.05$, [‡]for $p < 0.01$ in Mann-Kendall trend test, and *for $p < 0.05$, **for $p < 0.01$, ***for $p < 0.001$ in t -test.

表 4 月平均気温の長期トレンド (1980 ~ 2009).

Table 4 Long-term trend of monthly mean air temperature (1980-2009).

観測所名	1月	2月	3月	4月	5月
富山	0.6*	1.0 [†] **	0.8 [‡] **	0.5 [†] *	0.5 [†] *
高山	0.4	0.7*	0.4	0.3	0.5 [†] *
長野	0.4	0.7 [†] *	0.5*	0.2	0.3
高田	0.5	0.7 [†] *	0.6**	0.4	0.3
松本	0.3	0.8 [†] *	0.6 [†] *	0.3	0.3
岐阜	0.4	0.7 [†] *	0.4	0.4	0.3*
飯田	0.3	0.8 [†] *	0.3	0.3	0.4*
静岡	0.4	0.7 [†]	0.4	0.4	0.3
甲府	0.5	0.9 [‡] **	0.6 [†] *	0.4	0.3

単位 (mm/月/10年)

有意水準: [†] $p < 0.05$, [‡] $p < 0.01$ (Mann-Kendall trend test), * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ (t -test).

Significance level: [†]for $p < 0.05$, [‡]for $p < 0.01$ in Mann-Kendall trend test, and *for $p < 0.05$, **for $p < 0.01$, ***for $p < 0.001$ in t -test.

化という点では本研究と整合的であるが、春季流量の動向としては逆傾向である。この相違の要因としては、流域の標高の違いが考えられる。本研究で用いた流量データは宇奈月ダム下流のものであり、この場合の流域平均標高は 1707 m である。これに対し、黒部ダム流入河川の流域平均標高は 2158 m と 500 m 近く高い。したがって、上流部では融雪の開始時期が遅いために温暖化の影響が春季流出の増加として現れたのではないかと思われる。

CTの長期トレンドと流域平均標高の関係を図4に示す。北陸の河川に限定すると、両者の間には高い相関 ($r = -0.65$) が認められる。しかしながら、姫川のみ異なる傾向をもつ。前述したように、北陸における5月の河川流量はほとんどの河川で減少トレンドを示すが、姫川のみ増加トレンドを示している(表2)。このように姫川の流量に関する長期トレンドは特異性をもつことから、姫川を除いてCTの長期トレンドと流域平均標高の関係を改めて調べると、両者の関係は統計的に有意 ($r = -0.94$, $p < 0.01$) なものとなる。したがって、北陸地方では標高が高いほど温暖化による融雪流出の早期化が顕著となる傾向は疑う余地がない。このような傾向は、標高が高いほど

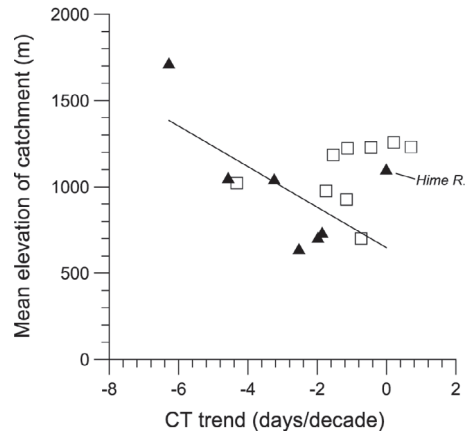


図 4 各河川の CT の長期トレンド (1980 ~ 2009) と流域平均標高の関係 (黒三角は北陸の河川, 白抜き四角はそれ以外の河川をそれぞれ示す).

Fig. 4 Relationship between long-term (1980-2009) trend of CT and mean elevation of catchment. Solid triangle denotes rivers in the Hokuriku area, and open square denotes other rivers.

降雪量も増加するという同地域の特徴を反映したものと考えられる。

3) 融雪流出時期と桜開花日の関係

Yamanaka *et al.* (2012) は CT と桜開花日の経年変動の相関が北陸地方でとくに高いことを見

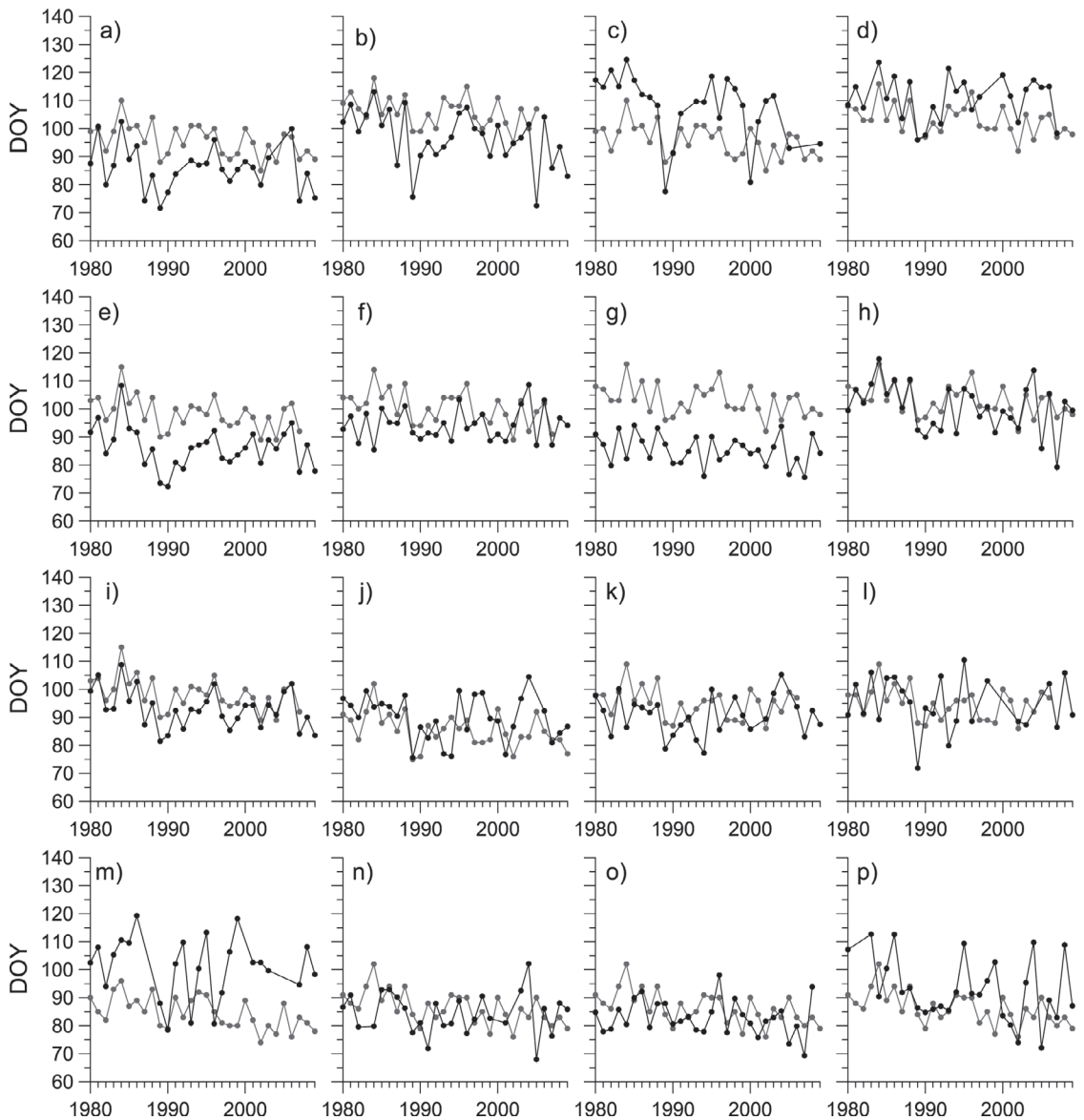


図5 融雪流出の中心日 (CT; 黒丸) と桜開花日 (灰色丸) の経年変動. a) ~ p) は図2に同じ.

Fig. 5 Inter-annual variations of center time (CT) of snowmelt runoff (solid circle) and flowering date of cherry trees (gray circle). a) to p) represents the same rivers as in Fig. 2.

いだしている。このことは、気候変動に対する融雪流出と生物季節の応答の同調性が高いことを意味すると同時に、CTがダム等による人為的流量制御には完全に支配されず、温暖化に伴う融雪流出時期の変動を適切に反映していることを示唆し

ている。図5によれば、日本海側の諸河川では実際に両者の年々の変動パターンが一致していることが多い。とくに、魚野川 (図5i)・信濃川 (図5h) では変動パターンだけでなく絶対値そのものも近い値を示す。しかし、内陸および太平洋側の

表 5 桜開花日の長期トレンド (1980～2009).

Table 5 Long-term trend of flowering date of cherry (1980-2009).

観測所名	桜開花日 トレンド
富山	-3.2 ^{‡***}
高山	-2.6 [*]
長野	-2.5 ^{†*}
高田	-3.1 ^{†***}
松本	-3.4 ^{†***}
岐阜	-2.8 ^{†*}
飯田	-1.9
静岡	-3.6 ^{‡***}
甲府	-3.6 ^{‡***}

単位 (日/10年)

有意水準: [†] $p < 0.05$, [‡] $p < 0.01$ (Mann-Kendall trend test), ^{*} $p < 0.05$, ^{**} $p < 0.01$, ^{***} $p < 0.001$ (t -test).

Significance level: [†] for $p < 0.05$, [‡] for $p < 0.01$ in Mann-Kendall trend test, and ^{*} for $p < 0.05$, ^{**} for $p < 0.01$, ^{***} for $p < 0.001$ in t -test.

河川では変動パターンが一致している年代も散見されるものの、全体としての相似性はさほど高くない。また、桜開花日の早期化トレンドは飯田を除くすべての観測地点で統計的に有意であるが(表5)、CTの減少トレンドが統計的に有意なのは神通川と黒部川のみである(Yamanaka *et al.*, 2012)。したがって、積雪が比較的少ない内陸・太平洋側の地域では、生物季節の変動は大きくても、融雪流出時期の変動は相対的に小さいといえる。

CTと桜開花日間の相関と流域平均標高との関係をみてみると、北陸の河川についてはきわめて強い関係性($r = -0.94$, $p < 0.01$)が認められる(図6)。また同様の標高依存性はCTと2月の気温の相関関係にもみられる($r = -0.91$, $p < 0.01$)。これらの関係はともに負の相関であり、冬季～春季の気温変動に伴う生物季節と同調した融雪流出の変動が標高の増加とともに不明瞭になることを意味する。これは、前節で述べた「標高が高いほど温暖化による融雪流出の早期化が顕著となる」という傾向と一見相反するようみえ

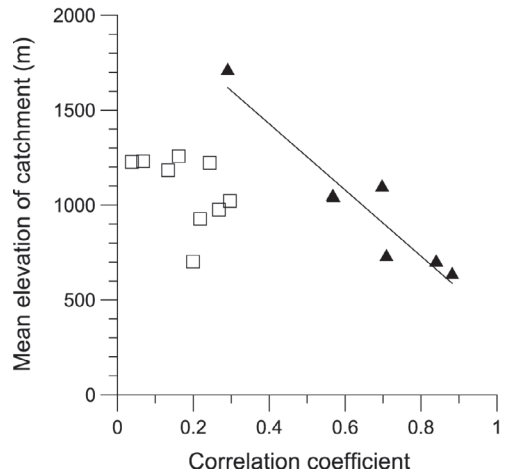


図 6 CTと桜開花日の経年変動の相関係数と流域平均標高の関係(黒三角は北陸の河川、白抜き四角はそれ以外の河川をそれぞれ示す)。

Fig. 6 Relationship of correlation coefficient between CT and flowering date of cherry trees with mean elevation of catchment. Solid triangle denotes rivers in the Hokuriku area, and open square denotes other rivers.

る。この原因として、流域平均標高が高くなるほど気象庁の地上気象観測所との鉛直距離が拡大して相関が悪化するという可能性も考えられるが、それ以外に、流域の標高が高くなるほど融雪流出時期が遅くなり、5月末までの流量では正確に融雪流出のタイミングを評価しきれない可能性が考えられる。実際、表2には示されていないが、北陸の河川の夏季(6・7・8月)流量の長期トレンドは標高と高い相関($r = -0.82 \sim -0.92$, $p < 0.05$)をもち、流域平均標高が高いほど夏季流量の減少が著しい。

換言すれば、北陸地域では冬季気温(とくにその年々変動)に対する春季までの融雪流出の応答が500～1000 m程度の標高帯において明確であるといえる。これに対し、それ以上の標高帯では、融雪流出が夏季にまで及ぶため春季以降の気温・降水量変動の影響を受けることになるが、長期的な温暖化傾向に伴う融雪流出の早期化はより顕著に表れると解釈される。

北陸以外の地域では積雪量が相対的に少ないた

め、上記のような傾向を検出するのは難しいが、融雪流出の変化はあったとしても軽微であると考えられる。しかしながら、本研究で用いたCTという融雪流出指標も完全なものではなく、これでは検出できないような温暖化影響が内陸あるいは太平洋側の河川でも生じている可能性を完全には否定できない。この点については、降水や河川水の水素・酸素安定同位体組成を用いて融雪流出成分を同定するなどして、今後さらに検討していく予定である。

IV. まとめ

本研究では、中部山岳地域の16河川を対象とした1980～2009年の河川流量の解析から、融雪流出特性の標高依存性に関して以下のことが明らかとなった。

1. 平年の河川流量の季節変化パターンとして、多雪地帯である北陸地方の河川では融雪による2月から4月にかけての流量増加が顕著であるが、流域の標高が高い河川では融雪流出時期が相対的に遅くなる傾向がある。一方、北陸以外の河川では春季の流量増加傾向が認められるものの、むしろ夏季ないし秋季の流量が大きいくことが多く、融雪流出時期の標高依存性も明瞭でない。こうした地域差は、積雪量ならびに河川流出に対する融雪水の寄与の差を反映していると考えられる。
2. 北陸地方では、流域の標高が高い河川ほど長期的な温暖化に伴う融雪流出の早期化トレンドが顕著である。一方、500～1000m程度の標高帯では、融雪流出の早期化トレンドは高標高域よりも小さいものの、冬季気温の年々変動の影響が春季までの融雪流出に反映されやすく、桜開花日といった春の訪れを表す生物季節指標との同調性が高い。

以上のように、温暖化に伴う中部山岳地域の水文応答は北陸地方とそれ以外で大きく異なり、多雪地帯である北陸では融雪流出時期とその変動の標高依存性がきわめて顕著である。しかしながら、河川流量の解析だけでは実証が困難だと

も、北陸以外の地域で融雪水の寄与が皆無であるわけではなく、それが温暖化の影響を受けたり標高依存性を有したりする可能性も否定はできない。こうした問題については、同位体トレーサーなど他のアプローチを併用しながら、さらに追究してゆく必要がある。また、本研究では融雪流出に焦点をあてたが、温暖化に伴う山岳水文応答はそれだけに留まるものではなく、融雪期以外の温暖化影響の解明も今後の課題といえる。

謝辞

本研究は、文部科学省特別教育研究費「中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源再生をめざす大学間連携事業」の一部を使用して実施した。2名の匿名査読者からは本論文草稿の改訂にあたり有益なコメントを頂戴した。ここに記し、謝意を表する。

文献

- Aguado, E., Cayan, D.R., Riddle, L.G. and Roos, M. (1992): Climatic fluctuations and the timing of West Coast streamflow. *Journal of Climate*, **5**, 1468-1483.
- Barnett, T.P., Adam, J.C. and Lettenmaier, D.P. (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, **438**, 303-309.
- Beniston, M. (2003): Climatic change in mountain regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, **59**, 5-31.
- Dettinger, M.D. and Cayan, D.R. (1995): Large-scale atmospheric forcing of recent trends toward early snowmelt runoff in California. *Journal of Climate*, **8**, 606-623.
- Diaz, H.F., Grosjean, M. and Graumlich, L. (2003): Climate variability and change in high elevation regions: A review of possible impacts. *Climatic Change*, **59**, 1-4.
- Etchevers, P., Golaz, C., Habets, F. and Noilhan, J. (2002): Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology. *Journal of Geophysical Research*, **107** (D16), 4293, doi:10.1029/2001JD000490.
- 市川正巳(1973): 水文学の基礎. 古今書院. [Ichikawa, M. (1973): *Fundamentals of Hydrology* (Suimon-gaku No Kiso). Kokon Shoin. (in Japanese)*]
- 国土交通省 (2012): 水文水質データベース. [Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan (2012): Water Information System. (in Japanese)] <http://www1.river.go.jp/> [Cited 2012/04/01].
- McCabe, G.J. and Clark, M.P. (2005): Trends and

- variability in snowmelt runoff in the western United States. *Journal of Hydrometeorology*, **6**, 476-482.
- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J.C.J., Lang, H., Parmet, B., Schadler, B., Schulla, J. and Wilke, K. (2001): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Climatic Change*, **49**, 105-128.
- 日本河川協会 (2007): 雨量・流量年表データベース. 日本河川協会. [Japan River Association (2007): *Annual Records of Rainfall and Discharge Database*. Japan River Association. (in Japanese)]
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and Hanson, C.E. eds. (2007): *Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Shinohara, Y., Kumagai, T., Otsuki, K., Kume, A. and Wada, N. (2009): Impact of climate change on runoff from a mid-latitude mountainous catchment in central Japan. *Hydrological Processes*, **23**, 1418-1429.
- Stewart, I.T., Cayan, D.R. and Dettinger, M.D. (2004): Changes in snowmelt runoff timing in western North America under a "business as usual" climate change scenario. *Climatic Change*, **62**, 217-232.
- Stewart, I.T., Cayan, D.R. and Dettinger, M.D. (2005): Changes toward earlier streamflow timing across western North America. *Journal of Climate*, **18**, 1136-1155.
- Viviroli, D., Dürr, H.H., Messerli, B., Meybeck, M. and Weingartner, R. (2007): Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, **43**, W07447. doi:10.1029/2006WR005653.
- Wada, N., Kawada, K., Kawamura, R., Aoki, K. and Kume, A. (2004): Increasing winter runoff in a middle-latitude mountain area of central Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **82**, 1589-1597.
- Westmacott, J.R. and Burn, D.H. (1997): Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin. *Journal of Hydrology*, **202**, 263-279. doi:10.1016/S0022-1694(97)00073-5.
- Yamanaka, T., Wakiyama, Y. and Suzuki, K. (2012): Is snowmelt runoff timing in the Japanese Alps region shifting toward earlier in the year?. *Hydrological Research Letters*, **6**, 87-91.
- Zierl, B. and Bugmann, H. (2005): Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resources Research*, **41**, W02028. doi:10.1029/2004WR003447.

* Title etc. translated by T.Y.