

応答関数から見た融雪流出の特性

A Study on the Response Characteristics of Snowmelt Runoff

金沢大学工学部 高瀬 信 忠 Nobutada TAKASE

金沢大学工学部 宇治橋 康 行 Yasuyuki UJIHASHI

In this paper, by applying the filter-separation AR method, the response characteristics and non-linear separation laws of rainfall in snow season are compared with those of non-snow season and discussed. The results of analysis are as follows: (1) There is no significant difference between the response function of inter flow system in snow season and those of non-snow season. (2) The response function of groundwater flow in snow season shows an about half peak discharge and continues a longer period than those of the non-snow season. (3) In snow season more effective rainfall are supplied to the groundwater system than non-snow season.

Keywords: runoff, snowmelt runoff, response function

1. はじめに

わが国の年平均降水量は約1600mmであり、世界的に見れば多雨域であると言える。しかしながら、わが国の河川は急峻でしかも流路長が短いためその流出時間は短く、利用可能水量はヨーロッパなどの小雨域に比べてむしろ少ない。このため水需給関係の逼迫した地域が多くみられる。このような中で、冬期水源山地に蓄えられる積雪はその量と貯留時間の長さからきわめて貴重かつ重要な水資源となっている。したがって水資源の有効利用と管理のためには積雪期の河川の流出機構を解明することは重要である。

融雪出水に関してはこれまでに多くの研究が行われてきているが、融雪量の算定に重点をおいたものが多く、流出特性やその機構については簡単に扱われている例が多く^{1), 2)}、特に同一河川において、降雨流出と融雪流出の機構についての比較対比はほとんど行われていない。これは、流出現象そのものに未知の部分が多い、正確な融雪量の算定が容易でない、入力質が違っても流出の本質は変わらないと考えられていることなどによる。しかしながら、融雪流出現象に対する洞察を深め、さらにより優れた融雪流出モデル構築の目的からもこのような入力質とそれを受ける流域条件の異なる2種類の流出の比較検討を行うことは意義のあることと思われる。

本研究ではこのような観点から、流出特性を代表するものとして応答関数を取り上げ、日単位のデータを対象として非積雪期の流出特性との対比において積雪期の流出特性について検討したものである。

2. 流出解析

2.1 解析手法の選択

非積雪期と積雪期の流出特性あるいは流出機構について比較検討するための有効な手段の一つは、物理的な裏づけを持つ流出モデルを用いて流出解析を行い、モデル構造あるいはモデル定数について比較検討することである（もちろん、流出モデルそのものが流出現象、機構に対して何等かの仮定、近似単純化を行なっていることを忘れてはならないが）。積雪期の流出解析を行う場合に最も問題となるのが融雪量の推定である。これまでに多くの融雪量の推定法が提案されているが^{3), 4)}流域スケールでの推定には未だ問題が残されていると言えよう。したがって本研究でのような目的に対しては、入力である融雪量の算定をすることな

く流出解析を行える方法が望ましい。このような入力降雨あるいは融雪量のデータなしに流量データのみから流出解析を行える解析方法の一つとして、日野、長谷部らのフィルター分離AR法⁵⁾がある。彼らの手法によれば、数値フィルターにより流出の成分分離を行えば、各成分系は線形モデルであるARモデルで表現可能であり、さらにAR式からMA式への変換により成分単位図を求めることが出来る。またAR式から各成分系への入力降雨を逆推定することにより、降雨の各成分系への分離則を求めることも可能であり、これらの結果を通じて流出特性の議論が出来る。よって、本研究では流出解析法としてフィルター分離AR法を用いることとした。

2. 2 流量時系列の成分分離

流量時系列の成分分離に際しては、まず、流量時系列を積雪の影響のない時期（非積雪期）と積雪の影響のある時期（積雪期）とに分け、非積雪期の流量に対して次式で示される数値フィルターを設計し、流量時系列を地下水成分と中間・表面流出成分に分離する。

$$W(\tau) \begin{cases} = \frac{C_0 \exp(-\frac{C_1}{2}\tau) \sinh(\sqrt{C_1^2/4 - C_0}\tau)}{\sqrt{C_1^2/4 - C_0}} & (\tau \geq 0) \\ = 0 & (\tau < 0) \end{cases}$$

$$C_0 = (\delta/T_c)^2, \quad C_1 = \delta^2/T_c$$

ここに、 T_c は分離の時定数、 δ は減衰定数である。 δ は2-3の値が良いとされており、本研究では2.5を用いた。また分離の時定数 T_c は全流量時系列に対する自己回帰係数から決定した。次に積雪期の流量の成分分離に対しては、非積雪期と同じ数値フィルターを用いて成分分離を行った。これは、積雪期と非積雪期で数値フィルター、特に分離時定数を変えると分離された成分が異なるものとなるため、成分単位図を求めてもその差異を検討することにより両時期の流出特性を比較検討することが出来なくなるからである。

成分分離後の流出解析の手順については文献に譲りここでは省略する⁶⁾。

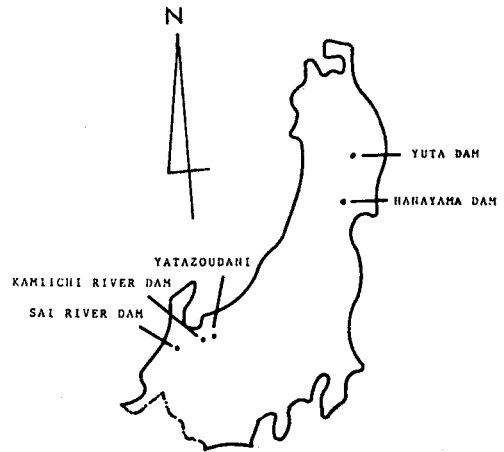


Fig. 1 流域位置

3. 解析対象流域

今回解析の対象とした流域は、北陸地方犀川ダム流域、上市川ダム流域、黒部川弥太蔵谷試験地流域、東北花山ダム流域、湯田ダム流域の5流域である。使用したデータは4ダム流域については多目的ダム管理年報に記載されている昭和46年-51年の5年間のデータ⁷⁾を、弥太蔵谷試験地については昭和50年-55年の5年間のデータをそれぞれ用いた。各流域の位置を Fig. 1 に示す。また、各流域の流域面積、流域地質を Table 1

Table 1 流域面積および地質

流域名	流域面積 (K ²)	流域地質
犀川ダム	57.8	第3紀火山岩類
弥太蔵谷	18.6	古生層
上市川ダム	44.7	古生層
花山ダム	126.9	第3紀火山岩類
湯田ダム	583.0	第3紀火山岩類

Table 1 分離時定数および成分時系列のAR次数

流域名	分離時定数 T_c (日)	成分流量系列のAR係数			
		非積雪期		積雪期	
		地下水	中間流	地下水	中間流
犀川ダム	5	4	2	4	2
弥太蔵谷	6	8	2	1 2	2
上市川ダム	5	4	2	4	2
花山ダム	3	4	3	4	2
湯田ダム	4	4	2	4	2

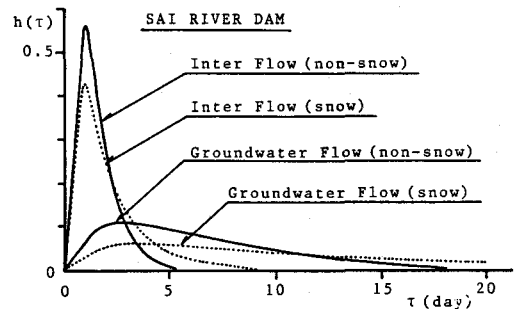
に示す。地質は各流域とも比較的一様であり、犀川ダム、花山ダム、湯田ダムの3流域は第3紀火山岩類で構成されており、上市川ダム、弥太蔵谷は古生層である。流域は、湯田ダム流域を除けばいずれも小流域である。

積雪期と非積雪期は、東北の花山ダム、湯田ダム流域では、1-6月を積雪期、7-12月を非積雪期とした。北陸の犀川ダム、弥太蔵谷流域ではそれぞれ1-5月、6-12月とした。

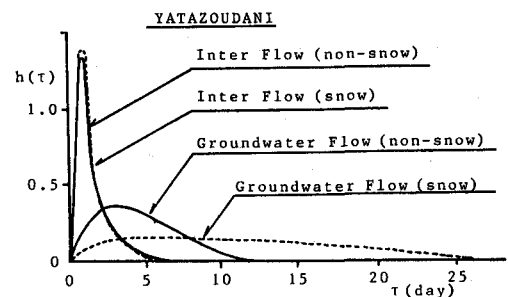
4. 解析結果と考察

4.1 応答関数

数値フィルターに用いた分離時定数 T_c と成分流量時系列に対して当てはめられたARモデルの次数を表-2に示す。各流域とも地下水流出成分と中間・表面流出成分の2つに分離すれば十分であった。対象5流域の非積雪期、積雪期の各流出成分の成分単位図を求めた結果をFig. 2 (a) - (e)に示す。図を見ると、上市川ダムおよび弥太蔵谷では中間・表面流出に対する成分単位図が非積雪期と積雪期ではほとんど同じであり、地下水流出成分の単位図が異なり、非積雪期に対して積雪期の単位図はピークがおよそ半分ぐらいであり流出時間が倍以上となり緩慢な流出特性を示している。また、犀川ダム、花山ダムでは前述の2流域と比べると、中間・表面流出成分の単位図に非積雪期と積雪期で若干の差がみられるもののほぼ等しい流出特性を示している。一方、地下水流出成分は前2流域と同様に積雪期の単位図はピークが小さく流出時間の長い緩慢な流出特性を示している。すなわち、これら4流域では、中間・表面流出が発生するような入力があった場合、それが降雨であっても融雪水であってもその流出には差がないことを示している。一方、地下水流出成分の単位図にこのような差の現れた理由は、積雪期では非積雪期と同じ分離時定数の数値フィルターで分離された成分の中により緩慢な流出成分、すなわち時定数の長い成分が多く含まれていることによる。また、湯田ダムの解析結果についてみると、他の4



(a)



(b)

Fig. 2 成分単位図

流域とは異なり中間・表面流出成分の単位図においても積雪期と非積雪期では大きな差がみられ、積雪期のそれはむしろ非積雪期の地下水流出に近い流出特性を示している。地下水流出に関しては、他の4流域とほぼ同じ傾向を示している。

4. 2 降雨の成分分離則

逆推定された全降雨 X と逆推定された地下水成分系への入力降雨 $X^{(1)}$ の関係、すなわち降雨の成分分離則をプロットしたものをFig. 3 (a) - (e)に示す。Fig. 3を見ると、5流域でそれぞれに差はあるが全流域に共通して次の事が言える。すなわち、降雨量が少ない間は積雪の有無を問わず降雨はほとんど全てが地下水流出への入力となり、降雨量が増加するにしたがって中間・表面流出への入力が増加する。しかし、積雪期の方が同じ降雨量に対しては地下水流出への入力が多い。これは、非積雪期の場合、晴天が続く流域の表層、下層とも乾燥した状態に、融雪に比べて強い強度の雨が降るために下層へ浸透しきれない降雨が表層近傍で中間・表面流出となるためである。一方、積雪期では期間中地表面との境界で雪はわずかながらも解け続け、さらに融雪期に入ると融雪量は徐々に増加しながら継続するため表層および下層の土壤水分は非積雪期に比して高く、結果として下層への浸透量が増加するためである。

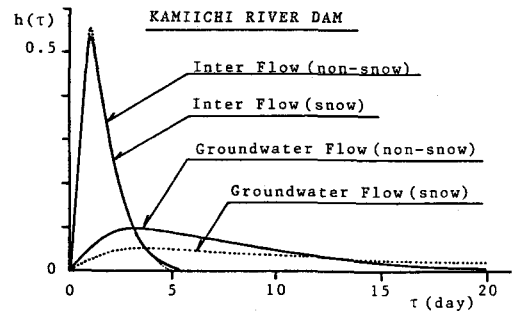
このような降雨の非線形分離則の差と前述の成分単位図の差を考慮すると、積雪期では時間強度の弱い入力が続くため地下水流出への入力が増加するだけでなく、より時定数の長い緩慢な流出成分が増加し、応答関数そのものも変化するようである。このことは流出の非線形性を示しているものとも考えられ、今後さらに検討を要する。

4. 結 語

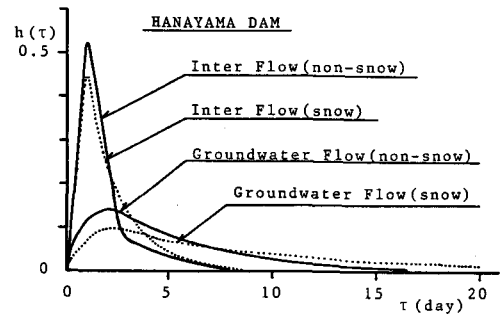
本研究ではフィルター分離AR法を用いて、北陸、東北の5流域の非積雪期、積雪期の流出解析を行った結果次のような事が明らかとなった。

- 1) 中間・表面流出成分の単位図には積雪の影響はほとんど見られず非積雪期と積雪期の単位図はほぼ一致した。
- 2) 地下水流出成分の単位図は、積雪期ではピークが非積雪期の約半分、流出時間は約2倍となり非積雪期に比べて緩慢な流出特性を示す。
- 3) 降雨の分離則は、非積雪期、積雪期とも非線形分離則を示すが、積雪期の方が地下水流出への成分降雨の割合が多くなる。

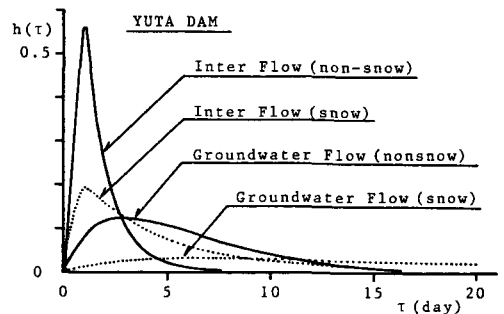
最後に本研究を行うに当たって、貴重な資料を提供して頂いた建設省黒部川工事事務所の関係各位に対し



(c)

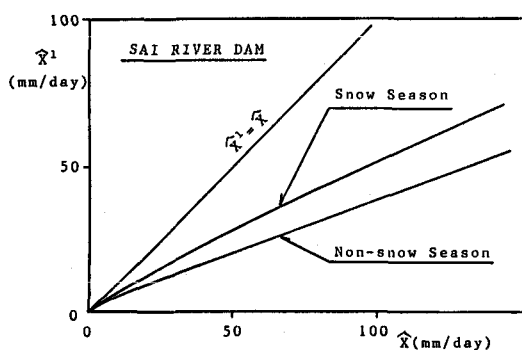


(d)

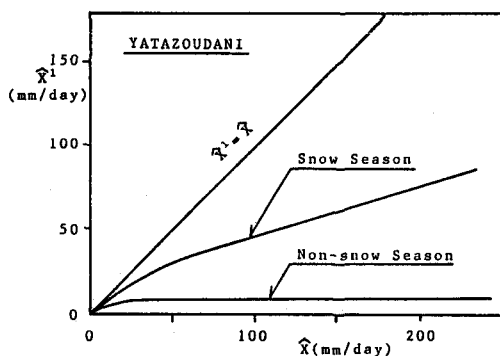


(e)

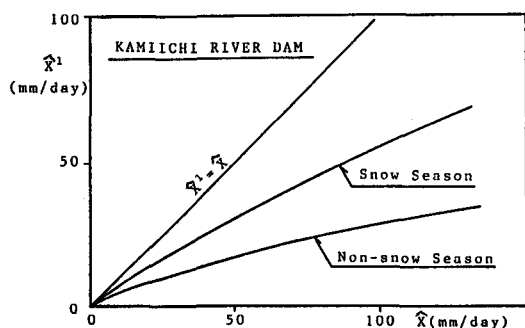
Fig. 2 成分単位図



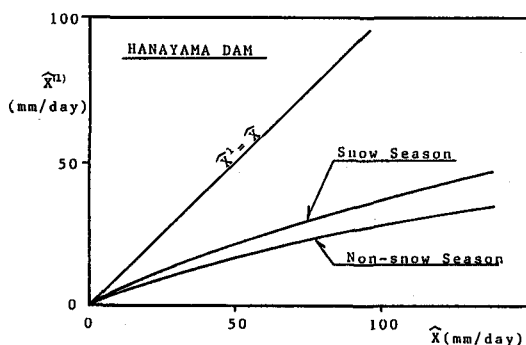
(a)



(b)



(c)

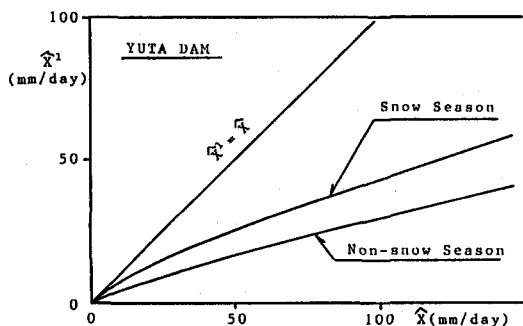


(d)

て感謝の意を表します。また、計算に協力して頂いた木津正人君（現 石川県庁、吉川光洋君に対しても謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 境 隆 雄：河川の融雪流出に関する研究、土木学会論文集、第95号、pp.9-20, 1963.
- 2) J. Martinec : Snow-Melt Runoff Model for Stream Flow Forecasts, Nordic Hydrology Vol. 6, pp.145-154, 1975.
- 3) Wilson, W. T. : An Outline of The Thermodynamics of Snow-Melt, Trans. American Geophysical Union, Vol. 22, pp.182-195, 1941
- 4) 小池俊雄, 高橋裕, 吉野昭一：融雪量分布のモデル化に関する研究、土木学会論文集、第363号／Ⅱ-4、pp.165-174, 1985.
- 5) 日野幹雄、長谷部正彦：流量時系列のみによる流出解析について、土木学会論文集、第300号、pp.43-58, 1980.
- 6) 例えば、日野幹雄、長谷部正彦：水文流出解析、森北出版、1985.
- 7) 建設省河川局：多目的ダム管理年報、1971-1976.



(e)

Fig. 3 降雨の非線形分離則