

黒部川流域における融雪出水に関する研究

著者	高瀬 信忠, 野村 継男
雑誌名	金沢大学工学部紀要 = Memoirs of the Faculty of Technology Kanazawa University
巻	8
号	1
ページ	49-58
発行年	1974-03-25
URL	http://hdl.handle.net/2297/25227

黒部川流域における融雪出水に関する研究

高瀬 信忠* 野村 継男**

A Study on the Snow-melt Run-off in the Kurobe River Basin

by

Nobutada TAKASE and Tsuguo NOMURA

Abstract

The measures for flood control are one of the important social problems. Especially in the rivers of much snowfall Hokuriku region, considerable high water levels are experienced in the period from March to May when the atmospheric temperature rises, therefore we should say that snow-melt run-off have great influences as regards the variation of bed, the embankment and the work object in river etc.. But on the other hand, as these snow-melt run-off are sources of supply in generation of electric power and public water etc., these are very valuable matter from view-point of the water utilization.

In this paper, we perform analysis on the Kurobe river basin in Hokuriku region by taking in degree-hour factor method etc., and we aim at contributing Something to the understanding of snow-melt run-off and the forecasting etc.

1. はじめに

わが国は気象的にも地形的にも出水による災害を受け易く、その洪水対策は重要な社会問題の一つである。特に降雪の多い北陸河川では、気温の上昇する3月から5月にかけて、かなりの高水位を維持することになり河床変動、堤体や河川工作物などに与える影響は実に大きいものがあるといわなければならない。すなわち融雪出水は時には融雪洪水をもたらし、治水上重要な問題であるとともに、また発電や公共用水などの供給源ともなるので、利水上からみても極めて重要な問題であるといわなければならない。

融雪出水に関する研究は1930年頃より米国で盛んに行なわれたが、熱収支に基づく理論的方法とDegree-day法による経験的方法に大別することができる。前者は太陽の放射による熱量、空気から伝えられる熱量、そして降雨から供給される熱量などを理論的に結びつけて融雪出水量を求めようとするもので、Wilsonの融雪に関する熱力学的研究がとくに注目され¹⁾、Lightもまた同様の理論的研究

*土木工学科

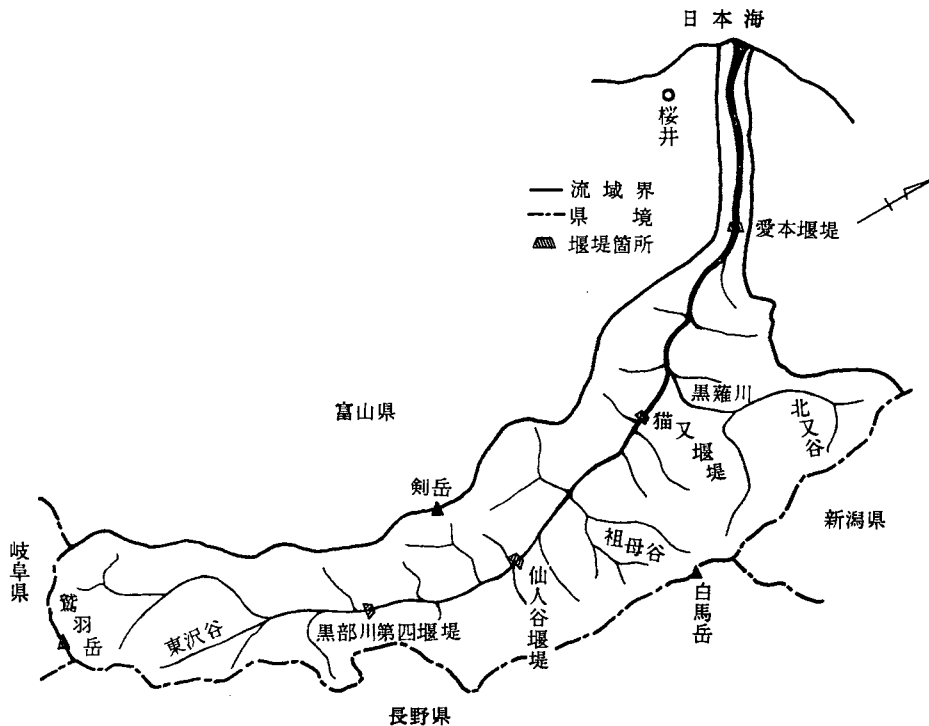
**大阪府土木部（前工学研究科大学院学生）

を行っており²⁾、その厳密性は高く評価されるが、計測などの点で難点があって実用性に乏しい欠点がある。後者は気温、日射、風、湿度、降雨や地熱などの融雪因子を専ら気温で代表し融雪出水を推算する方法であって、その指標として Degree-day を考え、米国において実用的方法として発展したもので、野外での観測調査および研究において注目すべき結果が発表されている³⁾。わが国においても、1950年頃よりこの種の研究がなされているが⁴⁾⁵⁾、境博士は独自の気温日変化方程式を提案してこれを発展させ、わが国河川においては Degree-day (日気温) に代えて Degree-hour (時間気温) の必要なことを強調し、Degree-hour による 0°C 以上の積算気温と融雪出水量を対応させ、北海道河川の沙流川流域について解析した⁶⁾が、われわれも北陸河川を対象にして、融雪出水について研究している⁷⁾⁸⁾。

Degree-day とは日平均気温の 0°C 以上の気温差であって、例えば、日平均気温を 5°C とすれば 5 Degree-day という具合に定義し、単位 Degree-day あたりの融雪量あるいは出水量を Degree-day factor とよんでおり、凡そ 0.09~0.7 cm/°C day となっている。しかし米国などの河川では時間の単位は日変化で十分であろうが、わが国の河川では不十分であって、したがって 1 時間単位とし、精度上からも積算気温面積と融雪出水量との相関に着目した Degree-hour factor による方法が望ましいと考えられる。本研究では、北陸河川の黒部川流域を対象として Degree-hour factor 法による融雪出水の把握と予報などに役立てようとするものである。

2. 解析対象流域

解析対象流域としては北アルプスを縦断し、500~1,000 m 以上に達する深い峡谷を削って流下している北陸河川の黒部川を選んだ。その流域形状は第 1 図に示すとおりであるが、その源を中部山岳の



第 1 図 黒部川流域図

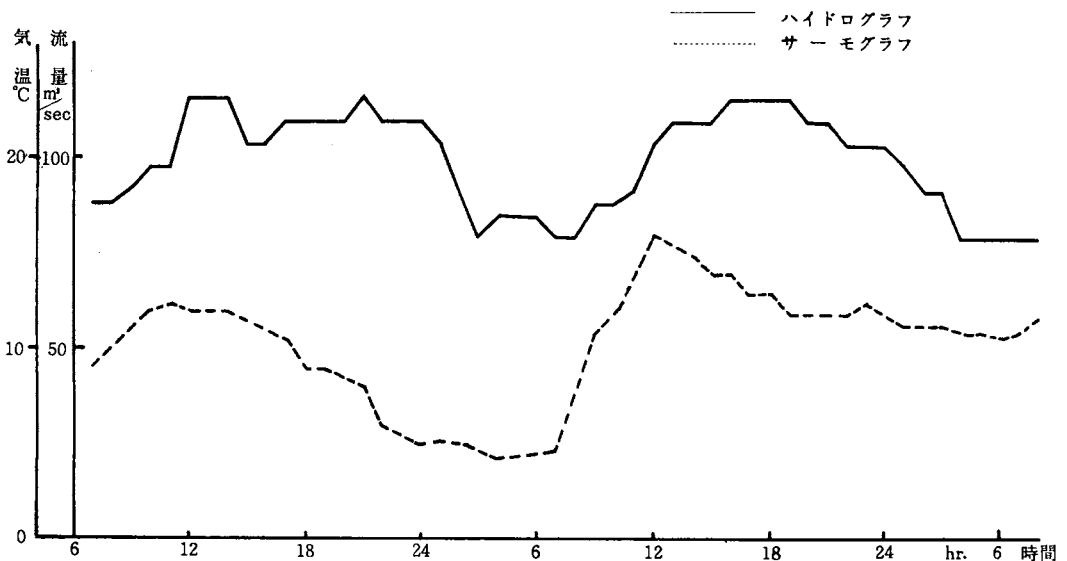
富山県上新川郡大山町鷺羽岳（標高2,924 m）に発し、飛驒山脈とその前山たる立山連峰との間を一大峡谷をなして北流し、途中の大小180余の溪谷をあわせて、約71 kmばかりで、愛本に達し平野部に出る。そして平野部で河道を拡大しながら、北西に流れ、約14 kmにて日本海に注ぐ流域面積682 km²、流路延長85 kmで、山地率97.1%、平地率0.8%、水路面積率2.1%という本邦有数の急流河川の一つである。なお河川は山岳地帯を貫流している関係上、地勢が急峻にして、兩岸は巨岩が屹立して雄大な峡谷をなしており、とくに山間部は年雨量4,000 mm以上の地域に属しているのみならず、年間の大半を雪で覆われる上流黒部峡谷はもちろんのこと、冬期には流域平均約5 mの積雪をみるといわれ、そのため水量が非常に豊富である。さらに平均河床勾配が約1/40という急勾配であるため、水力電力の好適地になっており、上流部には有名な黒四ダム（黒部川第四堰堤）が昭和38年6月に竣工しているが、総出力は計600,000 kwにも達している。

しかし地形が急峻で露岩が多いことから保水力に乏しく、豪雨や融雪水は洪水による出水となって急激に流出してくることになるが、洪水回数だけを見ても最近の記録では融雪出水が約20%近くにも達している。解析対象地点としては、下流の平野部に出る愛本堰堤地点を選んだ。同地点での毎時流量記録はあるが流域内には毎時気温がないので、この地点から約10 kmばかり離れた第1図に示してある桜井地点での毎時気温記録を用いて解析を行なった。しかし毎時気温記録も資料が非常に少なく、昭和42年と44年の2か年間しかないので、これらの少ない資料をもとにして積算気温と最低気温との相関解析も試みてみたものである。

3. Degree-hour factor による解析

(1) Degree-hour factor の概念

融雪出水解析の一方法として、融雪に関係する気象因子には気温、風、日射、湿度や地熱など種々のものが考えられるであろうが、ここでは気温のみに着目してこれを取り扱った。一般に地熱は積雪下では地面はかなりの深さまで冷えているので、その影響は非常に小さく、日射はこの影響が気温に反映され、風は局地的にみた場合、融雪量とよい相関をもっているが流域全体を考えた場合、定量的



第2図 サーモグラフとハイドログラフの対応

な把握も困難であるけれども結果的には雪面上の空気を乱し、雪面温度を変化させるのであるから、雪面上の気温変化が最もよくこれを反映し、また湿度と雨は、雨が暖雨なら考慮されるべきであるが熱量としては案外小さいともいわれている。第2図に気温変化とこれに伴う融雪ハイドログラフとの関係の一例を示したが、非常に相関性の強いことがわかるであろうと思われる。いま気温時融雪率を r とすれば、 r はサーモグラフ (Thermograph, 毎時気温グラフ) からハイドログラフ (Hydrograph, 毎時流量グラフ) へのグラフ上での面積変換率ともいうべきものであって、融雪出水総量を ΣQ 、積算毎時気温を D 、流域面積を A とすると、 r は次式で与えられる。

$$r = \frac{\Sigma Q}{AD} \quad (1)$$

しかし一般に各因子の単位のとおり方により、同じく融雪出水量を Q 、積算気温を D 、流域面積を A として、Degree-hour factor f_s を次式で定義している。

$$f_s = \frac{\Sigma Q \times 3,600 (\text{m}^3/\text{°C} \cdot \text{h}_r)}{AD \times 1,000^2} = \frac{3.6 \Sigma Q (\text{mm}/\text{°C} \cdot \text{h}_r)}{AD} \quad (2)$$

ただし、 ΣQ : ハイドログラフにおける1時間単位の全流出量 (Q の単位は m^3/sec)

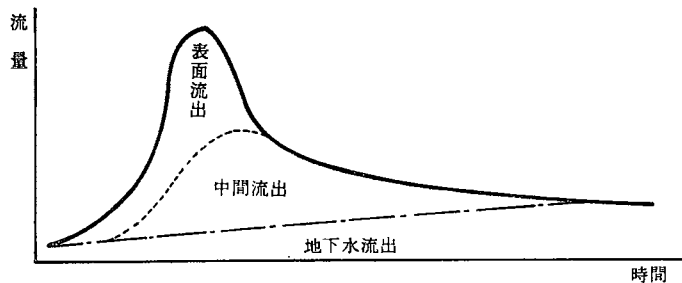
A : 流域面積 (km^2)

D : 積算気温で1時間単位気温 T の和 (T の単位は $^{\circ}\text{C}$)

(2)式により 0°C 以上の積算気温と、それにより生ずる融雪出水量とを比較して Degree-hour factor を決定するのであるが、まず一日あたりの積算気温により、どれだけの融雪出水量があるかをハイドログラフ上で決定することが必要となる。

(2) 基底流量の分離

降雨や融雪水などのように地表面に達した水は地表面を流下して河道に入る表面流出と、いったん地表面より地下へ浸透し重力の作用により地中を流動するが、地下水面に達しないで比較的地表に近い層を移動あるいは再び地表に出て河道へ流出する中間流出および飽和層まで達して地下水に加わる地下水流出とに区別されるであろう。第3図は、これら流出3成分のハイドログラフ上での概念分析



第3図 ハイドログラフ流出成分の分離

であるが、この地下水流出は、地下水水面が河床より下らない限り河道へ流出し無降雨期間の河水を涵養することになる。したがって融雪出水解析を行なう場合には、この地下水流出を基底流出として分離する必要があるが、融雪期の基底流量は、これを巨視的にみれば次のような特性を持っているといえることができる。

- ① 融雪初期の基底流量は冬期渇水量とほぼ等しい。

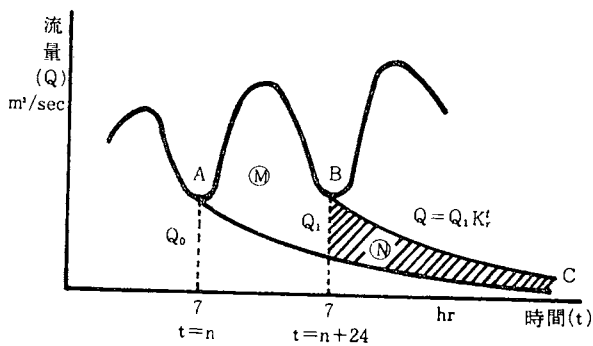
② 融雪期の進行とともに増大し、最盛期には比較的高い流量値を持続する。

③ 融雪期の末には次第に減少し、低い流量値へと落ち着いてゆく。

しかし、この黒部川では融雪期間が3月下旬から5月上旬と、比較的短いので、この基底流量を一定と考えた。この分離方法としては種々の方法があるが、ここでは融雪現象が起こっていないと考えられる冬期間（1月～2月）のハイドログラフをみると常に一定の水位で流れていることから、これは明らかに気温融雪に関係のない流量として、融雪期のハイドログラフより水平分離によって分離することとしたのである。

(3) 融雪出水量の算定

まず融雪出水量 Q を算定するには、前述の方法により基底流量をハイドログラフより分離するのであるが、ハイドログラフの解析で明らかなように第4図における減水部分 BC は最初の流量を Q_1 、



第4図 1日あたり融雪出水量の計算

減水係数を K_r 、時間を t とすると、 $Q = Q_1 K_r^t$ で表わされる。このような減水曲線が定まれば、ある1日の積算気温に対応する融雪ハイドログラフは同じく第4図に示すように、ハイドログラフの隣り合う谷（最低点） A, B から減水曲線を引いて求めることができる。ここで最低点 A, B のとり方が問題となるが、黒部川では気温の最低時刻が大体午前4時頃で、これに対応するハイドログラフ上の点は約3時間おくれて午前7時前後となっている。そこで一般に気温の最低時刻を午前4時、ハイドログラフが最低の流量値となる時刻を7時と決めたのである。

一方、サーモグラフの1区切りは1日単位の隣り合う谷から谷であって、ハイドログラフもこれに1日単位で同じく1区切りを対応させるわけであるが、前述のとおり約3時間の遅れで対応しているものとみることができる。融雪出水量としては、これが第4図に示す④の部分に対応するわけである。そして同じく第4図に示すように、ピーク流量以下の減水が同じ減水係数で無限に続くものと考え、1日あたりの流出量は2つの減水曲線で囲まれた部分④と⑤の和で表わされるものと仮定する。すなわち、⑤の部分は隣り合う減水曲線で切りとる部分であってピーク流出量以下の減水係数を K_r とすると、

$$\begin{aligned} \text{⑤の部分} &= \int_{n+24}^t Q_1 K_r^{-(n+24)} dt - \int_{n+24}^t Q_0 K_r^{-n} dt \\ &= \frac{Q_1}{\log_e K_r} [K_r^{-(n+24)}]_{n+24}^t - \frac{Q_0}{\log_e K_r} [K_r^{-n}]_{n+24}^t \\ &= \frac{Q_1}{\log_e K_r} \{-1 + K_r^{-(n+24)}\} - \frac{Q_0}{\log_e K_r} (-K_r^{24} + K_r^{-n}) \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\log_e K_r} (Q_0 K_r^{24} - Q_1) + \frac{1}{\log_e K_r} \{ Q_1 K_r^{-(n+24)} - Q_0 K_r^{-n} \}$$

ここで、 $t \rightarrow \infty$ とすると上式はつぎのようになる⁹⁾。

$$\textcircled{N} \text{の部分} = \frac{1}{\log_e K_r} (Q_0 K_r^{24} - Q_1) \tag{3}$$

したがって、(2)式における1日単位の融雪出水量は

$$\Sigma Q = \textcircled{M} + \textcircled{N} \tag{4}$$

で表わされることになる。

ここで減水係数 K_r は減水部の流量を半対数紙の縦軸に時間を横軸にとって直線を引き、その傾きから得られることはいうまでもないのであるが、 K_r は毎時気温のある昭和42年と44年について計算して第1表の結果が得られている。1日当りの融雪出水量 ΣQ は(4)式によって求められるが、(1)あるいは(2)式による r または f_s の計算結果は第2表のとおりである。

第1表 減水係数 K_r の計算値

年 月.日	42年	44年
4.6	0.979	
7	0.928	
8	0.930	
9	0.929	
22	0.956	
24	0.954	
25	0.986	
26	0.954	
28	0.948	0.975
29	0.977	
5.1		0.984
2		0.982
3		0.981
4		0.979
13		0.977
14		0.981
平均	0.954	0.980

第2表 r または f_s の計算値

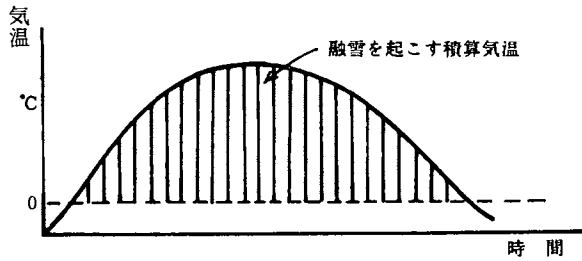
単位: $\text{mm}/^\circ\text{C} \cdot \text{h}_r$

年 月.日	42年	44年
4.6	2.92×10^{-2}	
7	4.74	
8	3.94	
9	4.74	
25	3.72	
26	4.15	
27	2.89	
28	5.34	3.69×10^{-2}
29	3.46	
5.1		3.76
3		3.91
4		4.03
13		3.76
14		4.02
平均	3.94×10^{-2}	

(注) 月日が第1表と対応していないのは、気温資料が不完全なためである。

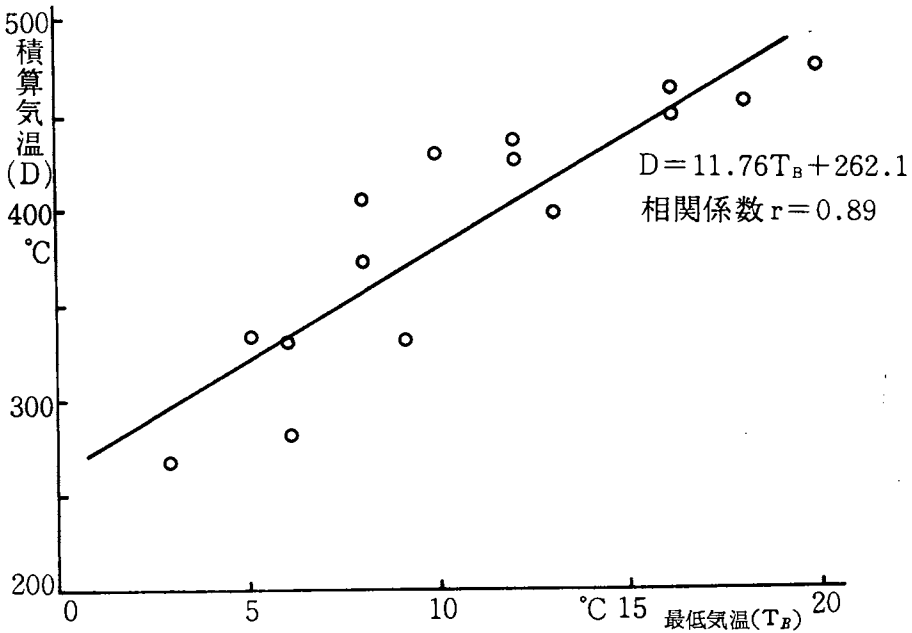
(4) 積算気温

融雪出水量を支配する主要要素である 0°C 以上の積算気温は第5図に示すように、図上ではこの積算気温部分の面積で示される。この積算気温は、サーモグラフからプランイメーターや三角形および台形公式によりその面積を求めることができる。本研究では積算気温が求められるのは、42年と44年の毎時気温記録がある年だけなので、他の年は朝9時と最高および最低気温の記録しかなかったので、



第5図 積算気温

42年および44年において求められた積算気温と最低気温との相関性を解析した。その相関解析結果は第6図に示すとおりである。これらの関係より、毎時気温のない他の年の積算気温を推定することができる。

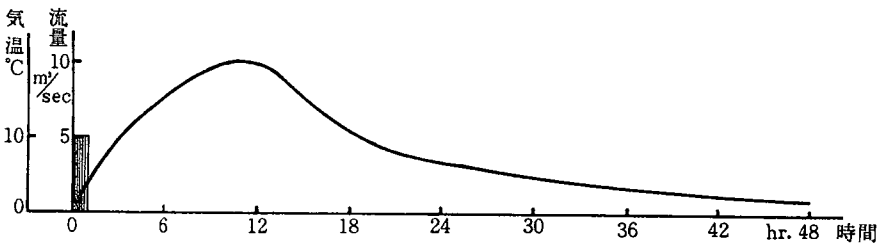


第6図 最低気温と積算気温との相関関係

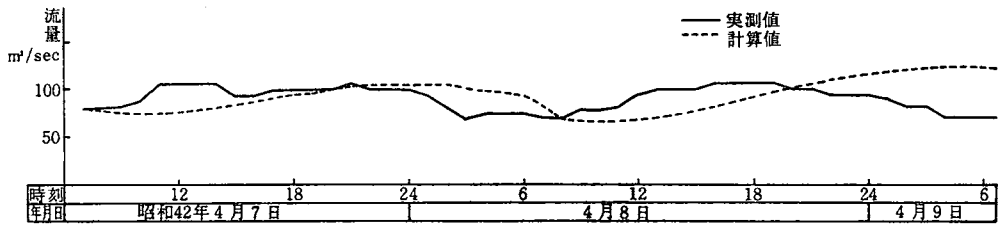
4. 気温単位図の推定および気温変化の予測

(1) 気温単位図の推定

第2表の r または f の平均値からもわかるとおり、全流域に平均1mmの融雪が起こったとした場合の積算気温は、 $D=25^{\circ}\text{C}\cdot h$ となるので、この関係から気温単位図を求めることができる。われわれは気温単位の図概念を導入して、信濃川支川柿川流域を対象として解析したが⁹⁾、同じような要領で



第7図 単位図



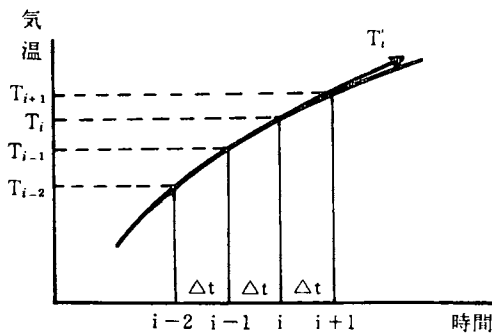
第8図 単位図の適用結果

第7図に示す単位図を推定した。そして、適用結果の1例が第8図に示されているが、融雪出水の予報という観点などから考えると高い精度とはいえないように思われる。この理由としては、入力としての気温は降雨と同じく流域平均的なものが必要であるのに、流域内に毎時気温がなかったため、流域外下流部の気温資料を用いて対応させたことなどが大きく影響しているものと思われる。

(2) 気温変化の予測

融雪出水と気温との相関が非常に強いことは第2図からもわかることであるが、そこで融雪出水の目安ともいうべき気温を前もって少しでも予測できたならば融雪出水を予知でき、更には災害防止および春季のダム操作という面などにおいても、大変意義深いものとなるであろうと思われるので、考察してみることにしたい。

いま気温変化曲線の1部が第9図のように与えられたとしよう。時刻 $t=i$ までに与えられた情報を



第9図 気温変化曲線

を利用して、時刻 $(i+1)$ 以降における気温 $T_{i+1}, T_{i+2}, T_{i+3}, \dots$ を予測しようとする訳であるが、変化曲線が一般に滑らかであるから、微分係数 T'_i を使って既知の気温より1つ後の T_{i+1} は、次式で近似される。

$$T_{i+1} = T_i + T'_i \Delta t \tag{5}$$

T'_i は T_i における接線(こう配)であり、また単位時間 Δt 間の増分を示すから、 $t=i-1, t=i$ の傾向が持続していると考えれば

$$T'_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \tag{6}$$

更に良い近似を得るため、微分として1つ前の $t=i-1$ における微分との平均をとると、

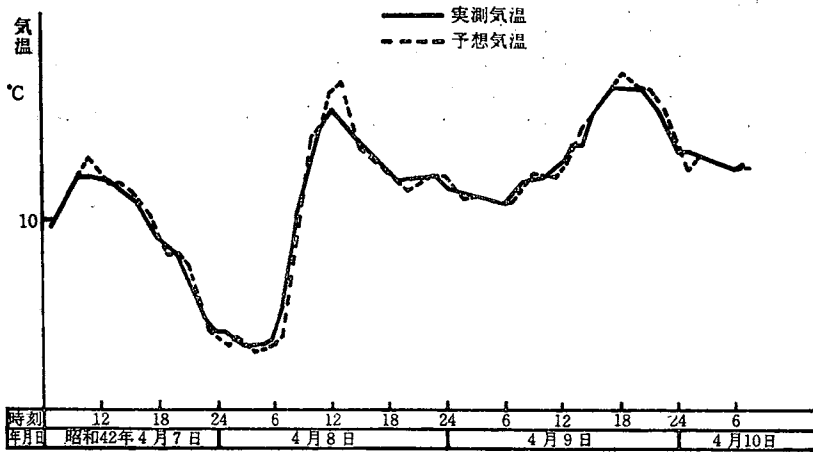
T'_i として

$$T'_i = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} + \frac{T_{i-1} - T_{i-2}}{\Delta t} / 2 = \frac{T_i - T_{i-2}}{2\Delta t} \tag{7}$$

(7)式を(5)式に代入すると

$$T_{i+1} = T_i + \frac{T_i - T_{i-2}}{2} = \frac{3T_i - T_{i-2}}{2} \tag{8}$$

したがって(8)式によって次の気温を予測するには、1つ手前とそれから1つおいて手前の記録があればよいことになる。しかし予報という観点からみれば、実測の資料を用いた場合には単位時間 (Δt , 普通は1時間) 後しか推定できないことになるので、推算値を使って先に伸ばして予報してゆくことにすれば、かなり先まで予報できることになるが精度が低下するものと思われる。前述したように黒部川流域においては、気温と融雪出水の遅れが約3時間であるので、気温で1時間先を予報できれば融雪出水としては4時間先を予報できることになるわけである。第10図に実測の資料を用いて予報し



第10図 気温の予知予報

た推算値と実測値の1例を示してあるが、融雪出水の予報という観点からみれば、これ位の精度および約4時間先を予報できるということなどから考えて十分であるように思われる。

5. おわりに

北陸地方などにおける積雪地河川の春の融雪出水は、治水上極めて重要な問題であるとともに、発電など利水上の水資源という立場からみても同じく重要な問題であり、いろいろな調査研究がなされているが必ずしも十分とはいえない現状である。このことは融雪出水機構の複雑性を物語っているようにも思われるが、黒部川流域内においては気温資料がなく、流域外下流部の桜井地点（解析対象愛本堰堤地点より約10 km下流）に気温資料があるので、同地点のものを用いた。しかし、融雪出水の解析に必要な毎時気温のある年が昭和42年と44年の2か年しかなく、更に融雪出水量が多分に黒四ダムの操作の影響をうけていると思われる点であろう。この黒四ダムの操業開始は、昭和36年1月からであり、その洪水および渇水調節の方法は、4～7月と9～11月の7か月間に総計約1.7億トンを貯留し、8月および12～3月の5か月間に放水して渇水対策としているのであるが、本研究によって幾つかの興味ある事実を解析することができた。少ない資料を使って解析したこれらの研究成果は、積雪地河川流域における融雪出水の把握やその予報面などに寄与するところが少なくないものと考えられる。

最後に本研究は、文部省科学研究費による研究成果の一部であり、資料の収集および解析に当って全面的な御援助をうけた建設省北陸地方建設局、とくに黒部工事事務所の担当者各位、ならびに計算に当って御協力願った当時学生の村中博昭君（株式会社奥村組）に対して深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Wilson, W. T. : An outline of the Thermodynamics of Snow Melt, Trans. A. G. U., 1941.
- 2) Light, P. : Analysis of High Rates of Snow-Melting, Trans. A. G. U., 1941.
- 3) Garstka, W. U. and others : Factors affecting Snowmelt and Stream flow, U. S. Department of the interior Bureau of Reclamation, 1958.
- 4) 井上章平：融雪出水の解析について，建設省直轄工事第12回技術研究報告，1958.

- 5) 山田陸郎：融雪洪水の予報について，建設省直轄工事第16回技術研究報告，1962.
- 6) 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，1963.
- 7) 高瀬信忠，山本忠勝，野村継男：日本海域流入河川の融雪出水に関する研究（——信濃川支川柿川流域を対象として——），金沢大学日本海域研究所報告，第3号，1971.
- 8) 高瀬信忠，野村継男：手取川流域における融雪出水に関する研究，金沢大学日本海域研究所報告，第4号，1972.
- 9) 前出7)

（昭和48年9月26日受理）