

融雪出水の解析

高瀬 信 忠

1. はじめに

洪水などの出水に対する対策は重要な社会問題の1つであるが、一般に降雪の多い日本海側、とくに北陸地方の河川においては融雪による春季の出水が目立っている。この融雪出水はまた、発電その他公共用水の供給源ともなるので利水上の見地からみても、極めて重要な問題となっている。しかしながら、降雪は降雨と違って一時に河川に流出してくるわけではなく一旦は流域に貯留され、春になって気温の上昇に加えて降雨や風などを伴う場合には、かなりの出水をひき起こすこともあるが、前線性や台風性の降雨などによる普通の出水に比べ、その供給水量の集中度が低い大洪水の危険性はまずないと考えてよいであろう。その代り出水の継続時間が極めて長く、長期間高水位を持続するので河床変動、内水問題、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す、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研究がとくに注目され¹⁾、Lightもまた同様の理論的研究を行なっており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。後者は融雪の因子を専ら気温に限って融雪出水量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⁾。この研究は、わが国河川が急流で、かつ流域面積も小さいため、Degree-day法を用いたときの矛盾をDegree-hourの概念を導入することによって解決した点において、大いに注目されるものといえることができるが、著者ら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)~11)}。

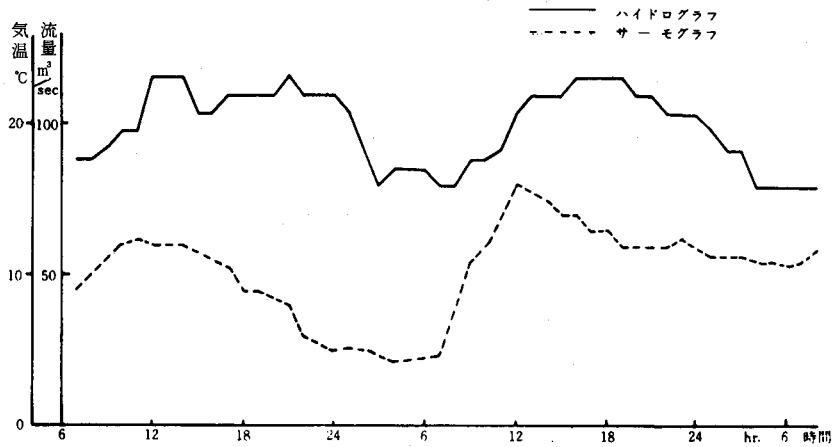
融雪に関係する気象因子としては、気温、日射、風、湿度、降雨、地熱などが考えられるが、日射量と気温とは高い相関関係にあり、したがって、気温が最も大きく影響するといわれている。また雨によるものは融雪に直接大きな影響はないといわれているが、積雪に含まれる水の吐き出しに大きく影響するであろうから、融雪出水としては降雨量もある程度関係してくるものと思われる。

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5Degree-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 $0.09 \sim 0.7 \text{ cm}/^{\circ}\text{C day}$ 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。

2 Degree – hour factor による解析

(1) Degree – hour factor の概念

融雪出水解析の1方法として、融雪に関係する気象因子には気温、風、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。図－1に気温変化とこれに伴う融雪ハイドログラフとの関係



図－1 サーマグラフとハイドログラフの対応

の1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。

$$r = \frac{\Sigma Q}{AD} \tag{1}$$

しかし一般に各因子の単位のとり方により、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。

$$f_s = \frac{\Sigma Q \times 3600 \text{ (m}^3\text{/}^\circ\text{C} \cdot \text{hr)}}{AD \times 1000^2} = \frac{3.6 \Sigma Q \text{ (mm/}^\circ\text{C} \cdot \text{hr)}}{AD} \tag{2}$$

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 $\text{m}^3\text{/sec}$)

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比較して Degree – hour factor を決定するのであるが、まず1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、一旦は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の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。

図-2は、これら流出3成分のハイドログラフ上での概念分析であるが、この地下水流出は、地下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うことができよう。

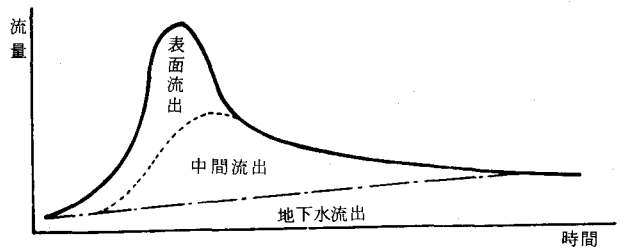


図-2 ハイドログラフ流出成分の分離

- 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、低い流量値へと落着いてゆく。

しかし北陸河川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

ように図-3における減水部分BCは最初の流量を Q_1 、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図-3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、

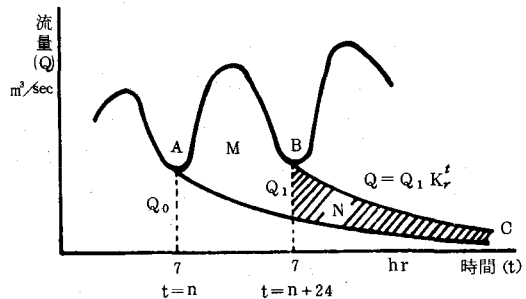


図-3 1日あたり融雪出水量の計算

同じく黒部川流域で調べたところ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時間遅れて午前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。

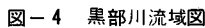
一方、サーモグラフの1区切りは1日単位の隣り合う谷から谷であって、ハイドログラフもこれに1日単位で同じく1区切りを対応させるわけであるが、前述のとおり約3時間の遅れで対応しているものとみることができる。融雪出水量としては、これが図-3に示すMの部分に対応するわけである。そして同じく図-3に示すように、ピーク流量以下の減水が同じ減水係数で無限に続くものと考え、1日あたりの流出量は2つの減水曲線で囲まれた部分MとNの和で表わされるものと仮定する。すなわち、Nの部分は隣り合う減水曲線で切りとる部分であってピーク流出量以下の減水係数を K_r とすると、

ここで、 $t \rightarrow \infty$ とすると上式はつぎのようになる。⁷⁾

したがって、(2)式における 1 日単位の融雪出水量は

で表わされることになる。

解析対象流域としては北アルプスを縦断し、500～1000 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。



A-4-4

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 4000 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。

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、洪水回数だけをみ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 ばかり離れた図 - 4 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 か年間しかないもので、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。

(5) K_r , r または f_s の推算値

前述の減水係数 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表 - 1 の結果が得られている。

表 - 1 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

表 - 2 r または f_s の計算値

単位: mm/°C・hr

年 月・日	42 年	44 年
4. 6	$2. 92 \times 10^{-2}$	
7	4. 74	
8	3. 94	
9	4. 74	
25	3. 72	
26	4. 15	
27	2. 89	
28	5. 34	$3. 69 \times 10^{-2}$
29	3. 46	
5. 1		3. 76
3		3. 91
4		4. 03
13		3. 76
14		4. 02
平 均	$3. 94 \times 10^{-2}$	

(注) 月日が表 - 1 と対応していないのは、
気温資料が不完全なためである。

1 日あたりの融雪出水量 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 の計算結果は表 - 2 のとおりである。

(6) 積算気温

融雪出水量を支配する主要要素である 0 °C 以上の積算気温は図 - 5 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であるが、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、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図-6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。

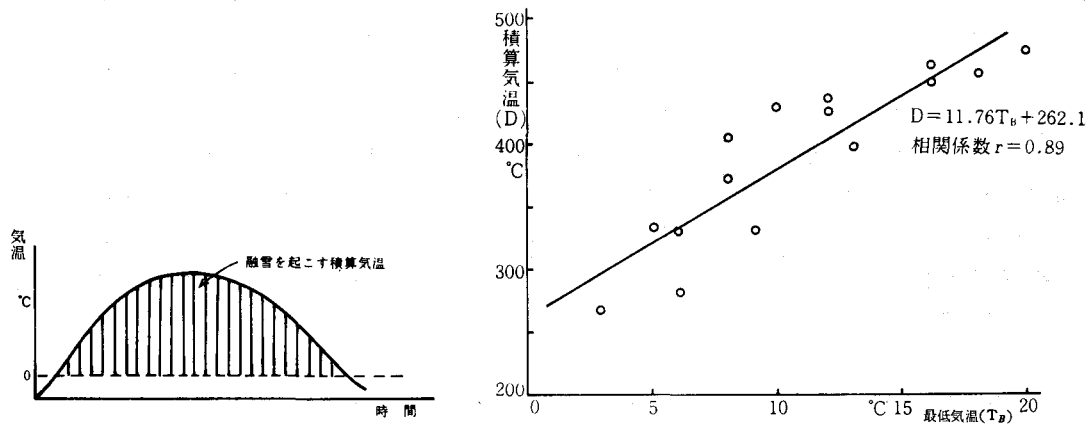


図-5 積算気温

図-6 最低気温と積算気温との相関関係

3. 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

表-2の r または f_s 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、 $D \div 25^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr}$ 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。著者らは気温単位図の概念を導入して、信濃川支川柿川流域を対象として解析したが、⁷⁾ 同じような要領で図-7に示す単位図を推定した。

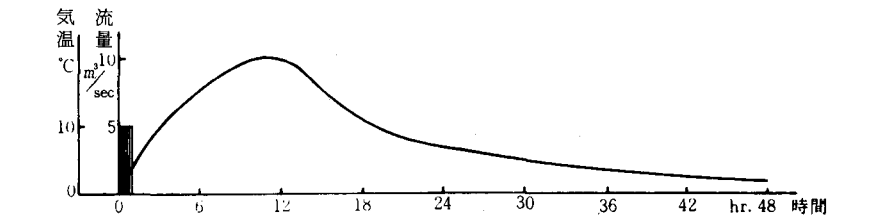


図-7 単位図

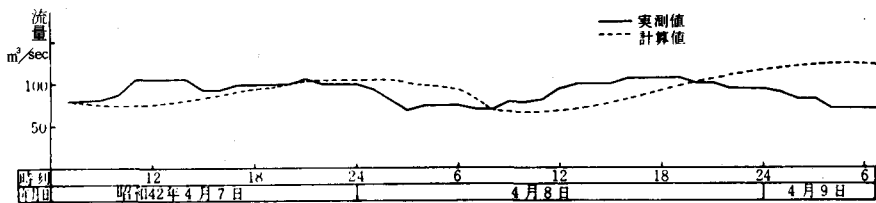


図-8 単位図の適用結果

そして適用結果の1例が図-8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。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ので、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図-1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部が図-9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} , …… 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。

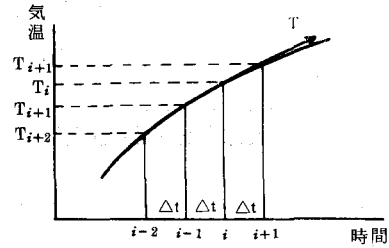


図-9 気温変化曲線

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

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

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

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

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

(7)式を(5)式に代入すると

$$T_{i+1} = T_i + \frac{T_i - T_{i-2}}{2} = \frac{3T_i - T_{i-2}}{2} \quad (8)$$

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。

図-10に実測の資料を用いて予報し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。

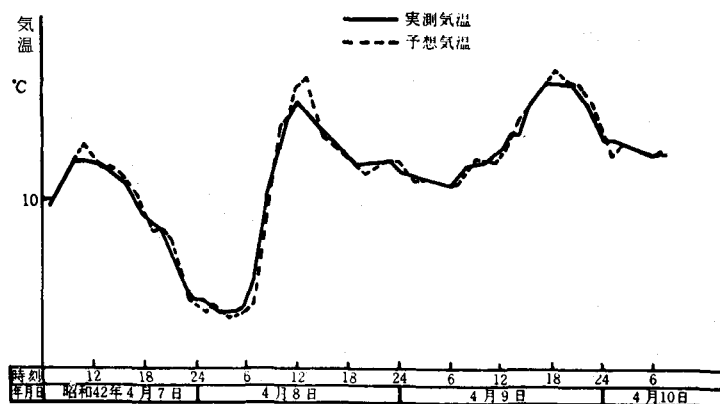


図-10 気温の予知予報

4. 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受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。なお、著者らは信濃川支川柿川流域を対象として、Degree-hour factor の変化の仕方から逆に流域内における雪線（Snow line）後退の問題などについて研究し⁷⁾、北陸河川の手取川においては体積気温の概念などを導入し⁸⁾、同じく興味ある事実を把握することができたが、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。

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) 山田睦郎 : 融雪出水の予報について、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, 野村健男 : 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) 高瀬信忠, 野村継男, 畑時男: 融雪流出への情報理論的アプローチに関する研究、金沢大学日本海域研究所報告, 第5号, 1973.
- 10) 高瀬信忠, 野村継男: 黒部川流域における融雪出水に関する研究、金沢大学工学部紀要, Vol. 8 -1, 1974.
- 11) 高瀬信忠, 能登勇二: 小矢部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7号, 1975.