

融雪流出水水質の特徴と流出解析への利用についての基礎的検討

Water Quality of Snowmelt Runoff And Its Use for Runoff Analyses

山梨大学工学部 正員 坂本 康

山梨大学工学部 正員 竹内 邦良

1. 序

融雪流出解析には、インプットとなる融雪量が直接にはわからないこと、積雪層内の移動も考慮すること等、降雨流出解析と異なる難しさがある。そのため、融雪流出解析では、これら融雪に特有な問題に主眼が置かれてきた^{1,2)}。しかし、時間・日単位での流出量変化を解析するには、真に流出に寄与している範囲、流出成分への分離則等、降雨流出とも共通する、浸透過程も含めた流出機構が問題となる。また、融雪という降雨とは異質な入力での流出を検討することは、流出機構解明への別の面からのアプローチともなりうる。以上のような考えから、本研究では、融雪流出を浸透過程も含めた流出機構の面から検討する立場をとる。その際、融雪量の情報の不足を補う意味で、水質についての情報を利用する。そして、融雪流出の特徴（例えば土壌が湿潤であること等）を生かした流出機構解析の可能性を探りたい。

本研究はこのような視点から、まず 1) 融雪流出水質の変動を観測し、その特徴と測定上の問題点を示し、さらに、2) 水質による流出成分の分離、3) 各成分の合成による融雪量の推定を試みる。

2. 観測地と観測方法

観測は北海道母子里、北海道大学演習林美深越沢川下流 ($44^{\circ} 21.7' N$, $142^{\circ} 16' E$) (Fig.1) で1984年4月25日午後5時 - 27日午前8時に行なった。美深越沢川は河川長約5 km、流域面積約11 km²、標高約290 - 610 m で、観測点付近では川幅は5 - 6 m、積雪深70 - 90 cmであった。この年、融雪は4月半ばから5月20日ごろまで盛んで、観測期間はその最盛期にあたっていた。

水質のうち、pH、pH 4.8 アルカリ度、電気伝導度は現場で測定し、その他は現場から冷蔵して実験室に持ち帰った試料水で測定した。硝酸イオン測定用の試料水は酸性にして保存した。流量、気温の資料は北海道大学低温研究所の観測施設から提供していただいた。pH はガラス電極 pH メーター、電気伝導度は伝導度計、水温は水銀温度計、pH 4.8 アルカリ度は pH メーターを用いた滴定法で測定した。硝酸イオンは Cd - Cu カラムで還元後、比色法で測定した。Na、K の測定は原子吸光法、塩素イオンは Mohr 法によった。また、有機物量の目安として、波長 275 nm での吸光度を測定した。

3. 水質観測結果と考察

融雪による河川流量と水質の変化を Fig. 2、3 に、また、積雪水の値を Table 1 に示す。融雪流出水質の長期変化については加藤ら³⁾、Skartveit ら⁴⁾、Cadle ら⁵⁾ の報告があるが、このような日変化を扱った例はない。また、融雪水は初期ほど高い濃度を示すことが知られており (Suzuki⁶⁾、Skartveit⁵⁾)、観測時の融雪水質も、表の積雪水の値より大きいことが考えられる。

pH は、電極をそのつど流水中に入れて測定した値である。値は pH 6.40 から 6.85 と比較的安定しており、周期的変化はみられなかった。積雪水の値は pH 5.72 だから土による緩衝作用がうかがえる。採取後の水はこれより 0.06 から 0.20 高い値を示した。流水による測定では、外気温が低いと測定値が安定するのに時間がかかること、採取後の水とは異なる値を示すことに注意を要する。

流量の日変化と対応するのは、電気伝導度、アルカリ度、硝酸イオン、有機物指標である 275 nm 吸光度、塩素イオン、及び水温であった。電気伝導度は流量ピーク時に最低となり、薄い成分による希釈効果を示唆している。アルカリ度、硝酸イオンの極値は流量ピーク時より 2 - 4 時間遅れて出現する。アルカリ度の原

Fig.1
Experimental
basin
-location
and
geography-

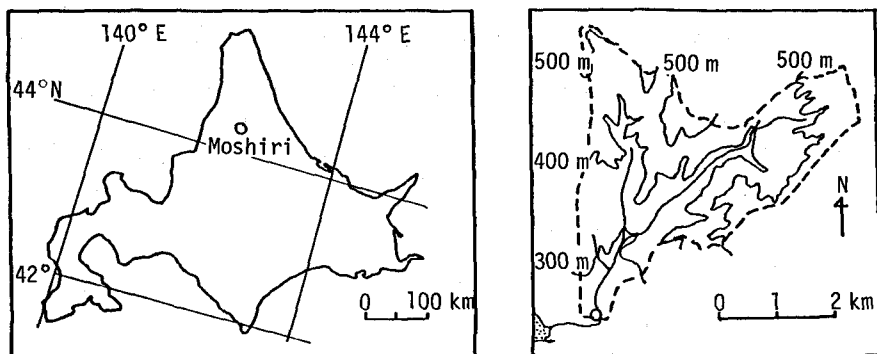


Fig.2
Hydrograph and corre-
sponding pH, temperature,
electric conductivity,
and pH 4.8 alkalinity
changes of river water.

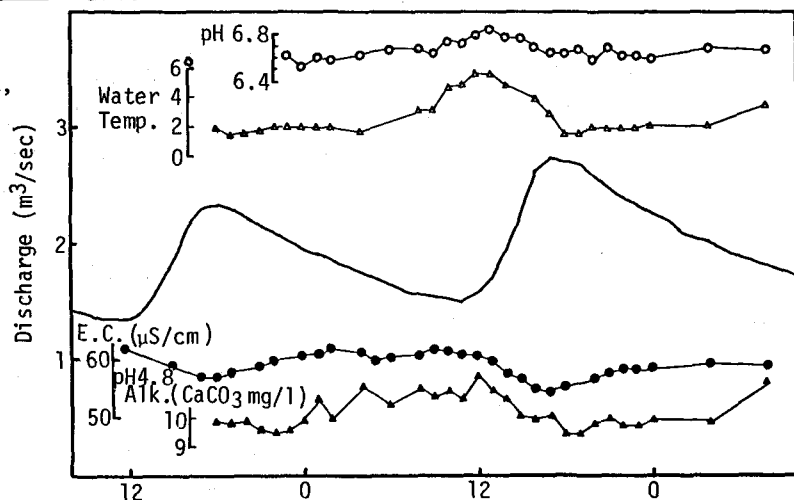


Fig.3
Hydrograph and corre-
sponding NO₃-N, 275nm
absorbance, Na, Cl, and
K changes of river water.

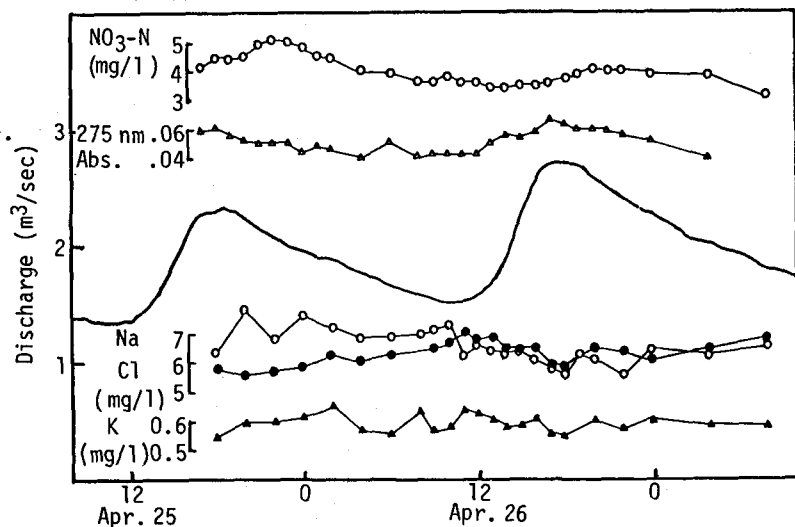


Table 1 Quality of snowpack-melt water.

pH	Electric conductivity μS/cm	pH 4.8 Alkalinity CaCO ₃ mg/l	NO ₃ -N mg/l	275nm Absorbance	Cl mg/l	K mg/l
-	-	-	-	-	-	-
5.72	30.1	1.5	0.40	0.008	0.13	0.25

因となる炭酸・重炭酸イオンは土中水に多く、また硝酸イオンも土中で分解した有機物に起因するので、この遅れは土中を流れる遅い成分の影響を示唆している。275 nm吸光度は流量ピークと同じころピークに達する。このことは、速い成分が有機物の多い表層土壌面を流れ、有機物の少ない土中での吸着作用を受けないためと考えられる。これらの水質変化は降雨流出の時と同じ傾向であるが、降雨流出に比べばらつきが小さいようだ。塩素イオンは最低流量のときに最高値を示すが、測定値のばらつきが大きい。水温は流量ピークの1時間後の午後6時ごろから気温の低下とは逆に上がり始めており、地温により暖められた遅い成分の影響があると考えられる。この水温と成分の関係については小林らの報告⁷⁾がある。Na、Kはばらつきが大きく流量の日変化との対応がみられないが、Naについては漸減傾向があるようだ。これらは原子吸光法の鋭敏さに比し自然的・人為的汚染を受けやすい低濃度であり、測定には注意を要する。

以上のことから、速い成分は水温・電気伝導度が低く、有機物が多めで、遅い成分は水温・電気伝導度が高く、分解した有機物によりアルカリ度、硝酸イオンが多い水質になっていると整理できる。このように、融雪流出では降雨流出と同様かあるいはそれ以上に、流出成分の違いが水質にあらわれるといえる。これは降雨強度のような不規則な要素がなく、水質変化の原因となりうる樹幹流の影響も小さいためと考えられる。したがって、水質による流出機構解析の可能性も大きいとも考えられる。

4. 水質を用いた成分分離

水質を用いた成分分離法としては、1) 各成分の濃度を一定と考え、その値を降水・基底流出水の値を参考にして仮定する方法と、2) 各成分の濃度の変化のしかたを仮定する方法がある。筆者らは、2) の一法として、土中を流れる水の硝酸イオン濃度は累加流量の指数関数で表わせることを利用した分離法を降雨流出について検討してきた⁸⁾。ここでも、まずこの方法による分離を試みた。結果をFig. 4に示す。図のように流出初期では定性的に妥当な分離結果を得られなかった。これは、この方法では遅い成分はある量の硝酸イオンを持った同じ場所をいつも流れると仮定しているのに対し、実際は前日の流出の影響のために流路・初期硝酸イオン量といった条件が微妙に変わるためと考えられる。このように、硝酸イオン流出の変化は、今後流出の物理機構の細部を考える上での重要な情報を含んでおり、さらに検討が必要であろう。図には $Q = a \cdot \text{EXP}(-b \cdot t)$ の式で外挿した通減曲線も示してある。このときの定数 b は日によって 0.015 から 0.03 と大きく異なるが、これも同じ原因による。Martinez¹⁾ は、融雪時の日平均流出量の推定式として前日の日平均流出量をパラメーターにとりいれるモデルを提案している。そのようなモデルが有効なもの、前日の流出の影響が大きいという融雪流出の特徴のためであろう。

次に各成分濃度を一定として適当に仮定して分離する方法を電気伝導度について試みた。速い成分の値として積雪の値 $30.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、遅い成分の値としてこの期間の最高値 $62 \mu\text{S}/\text{cm}$ を用いた。この結果をみると、土壌が十分湿潤な融雪流出では、降雨に比べ速い成分の寄与が小さいことがわかる。これは、同じ流域で小林が水温を使って分離した結果⁷⁾とも共通する傾向である。一般には、土壌表面が湿潤で飽和に近いほど浸透しにくく表面流出が多いと考えるが、この結果によると、湿潤な状態でかえって浸透量が増すことも考えられる。これは、流域土壌が湿潤であると、全体としては不飽和であるが部分的に飽和状態で浸透する水みちが形成されて、浸透量が大きくなるためとも考えられる。このことは、融雪流出においては流出寄与域、特に中間流出に寄与する領域が広範囲にわたっているとみなされるべきだということにもなる。このような土壌条件と浸透量との関係は流出寄与域を考える上での今後の課題として重要であろう。

5. 融雪量の推定

流出の物理的機構を考えるには、土壌に供給された水がどのように分離して流出するかを知らねばならない。そのためには、分離前・後の水量を対応させねばならない。しかし、降雨ではこの対応をとることが一般に難しい。それは、1) 降雨前の土壌条件に幅があり損失量の影響が大きい、2) 遮断等のため降雨強度

Fig.4
Hydrograph
separation
using $\text{NO}_3\text{-N}$
and E.C.

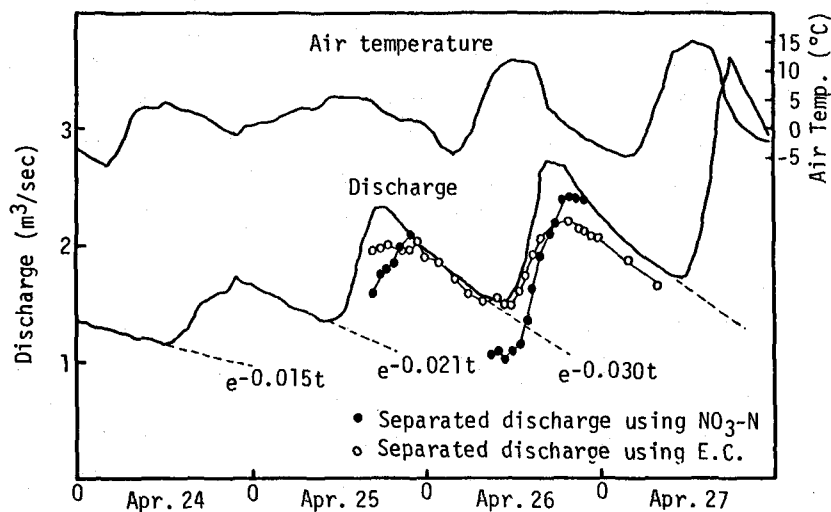


Fig.5
Air temperature vs. rate of
snowmelt estimated from
recomposition of separated
hydrographs.

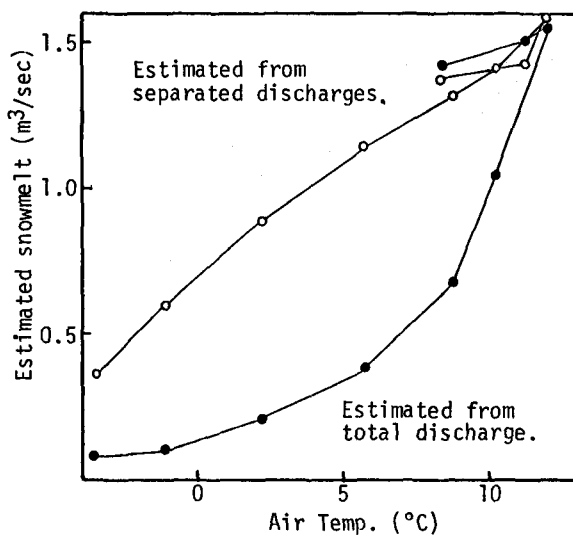
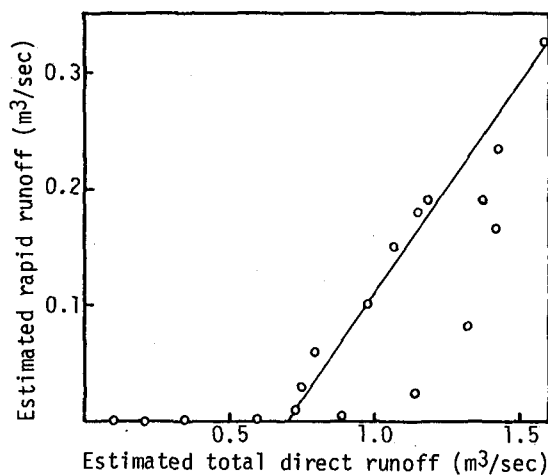


Fig.6
Estimated rapid runoff vs.
estimated total direct runoff.



と実際に土壤表面に供給される水量には時間的にも量的にも大きなずれがある、ためである。ところで、融雪流出を考えると土壤は常に湿潤な状態にあり、1)の影響は小さい。また遮断はなく、土壤に供給される水量の時間的・空間的分布も降雨ほど不規則でないため、2)の影響も小さいと考えられる。したがって、もし仮に成分に分離できたとしたなら、融雪流出のほうが降雨流出より流出機構の検討には適しているとも考えられる。本研究ではこのような立場から、以下のような簡単な状態を仮定して融雪量の推定を試みた。

融雪流出では土壤が湿潤であるため、供給された水は損失も時間的ずれもなく流出すると仮定する。その際速い成分と遅い成分に分かれるわけだが、速い成分のピークと遅い成分のピークは同じ時刻に供給された水によると考える。そこで、ふたつの成分をピークが一致するように重ね合わせたものを融雪水量と仮定する。この仮定は、土壤が湿潤な融雪流出で許されるのであり、一般の降雨流出では成り立たない。また、速い成分はもとより、遅い成分についても融雪による供給水量の波形がそのまま流出波形になると仮定する。

以上の仮定により、分離した成分を再合成して推定融雪量とし、気温 (Fig. 4) に対してプロットしたのが Fig. 5 である。但し、ピークが一致するように気温と速い成分、遅い成分とでは時刻をそれぞれ5時間、8時間ずらしてある。図には分離しない流量についても同様に気温との関係を示してある。そのままの流量では気温の変化に比べ流量の変化が遅れ両者の関係は線形にならないが、分離・再合成した推定融雪量では気温との関係が線形に近いことがわかる。但し、気温・融雪量が減少する時期にはこの対応はそれほどよくなくこの関係は一意的に決まらない。このように推定融雪量と気温との関係が一意的に決まらないのは、融雪量に関する因子が気温だけではないこと、波形が変化することのほかに、各成分濃度の仮定が正しくなかったことも考えられる。逆にいえば、推定融雪量と気温やその他の気象パラメータとの関係が妥当でかつ一意的に決まるように、各成分の濃度を試行錯誤により決める方法も有効かもしれない。

Fig. 6は全推定融雪量とそのうちの速い成分の量との関係を示している。これを見ると約 $0.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以下では速い流出はなく、それ以上では全融雪量に応じて速い成分が増えることになっている。データの数が少なくこれだけで結論づけるのは危険ではあるが、融雪のような土壤が湿潤な状態ではこのような単純な関係になることも十分ありえる。

6. 結論

(1) 融雪流出水の水質のうち流出成分比率の日変動による周期的日変化を示すのは電気伝導度、硝酸イオン、アルカリ度、有機物量、塩素イオン、水温である。pH、Na、Kでは傾向がはっきりしない。

(2) 融雪流出では、遅い成分が土中の同じ所を流れると考え、硝酸イオン濃度の指数関数的変化を仮定する方法ではうまく分離できない。これは、硝酸イオン濃度変化が、前日の流出の影響による流路・初期硝酸イオン量の微妙な違いをも反映するためと考えられる。各成分の水質が一定していると仮定して各成分を水質により分離する方法にはこのような問題はないが、各成分の水質の仮定には注意を要する。

(3) 融雪流出では、土壤条件が一定するため、融雪水は一定の関係で各成分へ分離されると仮定できる。この仮定によれば、分離した成分を重ね合わせることで融雪量をある程度逆推定できる。

(4) 今回の観測結果では、上記の方法により電気伝導度による分離結果を再合成して求めた推定融雪量と気温との間に線形に近い関係が得られた。また、全推定融雪量とそのうちの速い成分の量との関係も得られた。ただし、この点はさらに多くの観測により確かめる必要がある。

今後の課題としては、水質による分離の精度をあげるために各成分の水質をより詳しく検討して、仮定・推定をできるだけ少なくすることが必要であろう。また、推定融雪量と気温等との関係を使って分離結果の妥当性をチェックする方法も有効と考えられる。

なお、本研究にあたって、北海道大学低温研究所、小林大二先生に種々御便宜をはかっていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Martinec, J.: A Snowmelt-Runoff Model for Computing the Daily Discharge from Temperature Data, Studies and Reports in Hydrology, No.32, pp.87-103, 1982.
- 2) Price, A. G. and Hendrie, L. K.: Water Motion in a Deciduous Forest during Snowmelt, J. Hydrology, Vol.64, No.1-4, pp.339-356, 1983.
- 3) 加藤武雄・飯沢正: 農林省釜淵森林理水試験地1号沢の融雪期における水質について、Jap. J. Limnol., Vol.37, No. 3, pp.93-99, 1976.
- 4) Skartveit, A. and Gjessing, Y. T.: Chemical Budgets and Chemical Quality of Snow and Runoff During Spring Snowmelt, Nordic Hydrology, Vol. 10, pp.141-154, 1979.
- 5) Cadle, S. H., Dash, J. M. and Grossnickle, N. E.: Retention and Release of Chemical Species by a Northern Michigan Snowpack, Water Air Soil Pollution, Vol. 22, No. 3, pp.303-319, 1984.
- 6) Suzuki K.: Chemical Changes of Snow Cover by Melting, Jap. J. Limnol., Vol.43, No. 2, pp.102-112, 1982.
- 7) 小林大二・田中夕美子・本山秀明: 融雪洪水の流出機構、第20回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集、pp.108-111, 1983.
- 8) 竹内邦良・坂本康: NO_3^- を用いた流出成分分離と他の方法による分離結果の比較、第28回水理講演会論文集、pp.557-563, 1984.