

II-45

凍結土層の存在を考慮した融雪流出モデルに関する研究

北見工業大学大学院 ○学生員 松本隆志
 北見工業大学工学部 正会員 早川 博
 北見工業大学工学部 正会員 内島邦秀

1. はじめに

著者らはこれまで少雪寒冷地域に位置する北見市近郊の富里ダム流域に流出小試験地を設け(図-1), 流域が土壤凍結している場合の融雪流出特性について, 観測・解析を進めてきた¹⁻³⁾. その観測結果から, 凍結の進み具合によって融雪流出特性に違いが認められ, 土壤凍結の発達した年の融雪初期に長周期変動が確認できる形態と, 土壤凍結の未発達のにそれが確認できない形態に大別できる⁴⁾. この違いを明確にするため, 凍結土層の存在を考慮した融雪流出モデルを構築し, 土壤凍結による融雪流出への影響を評価・検討してきた³⁾. 本試験地は流域面積が0.084(km²)と小さいにも拘わらず流域の積雪水量や凍結深などの空間分布を考慮する必要があり, 融雪流出モデルとして流域を図-1に示すような3地帯に分割し, 各々に土壤水分構造を有する直列四段タンクモデル⁵⁾をあてはめた三列四段タンクモデル(図-2)を適用した. その結果, 凍結の影響は第一タンクの浸透孔開度の減少と土壤水分機構の容量低下によって表現できることが明らかとなった³⁾. しかしながら, 凍結深と浸透孔, あるいは土壤水分構造の容量との関係を定式化するまでには至っていない. 従って, 本研究では気温と積雪深から凍結深の経時変化予測モデルを構築し, 凍結深と浸透孔, 土壤水分構造の容量との関係を踏まえた融雪流出モデルの検討を行うことを目的としている.

2. 土壤凍結深の推定

本試験地の融雪流出解析³⁾では, 入力となる融雪量を Cold-Content(以下 C.C.)を考慮した Degree-Hour(以下 D.H.)法で算定し, 土壤水分構造を有する三列四段タンクモデルを適用してきた. これまでの解析から, 土壤凍結が発達している場合は, 二列目第一段タンクの浸透孔を絞り込むことにより融雪初期の長周期変動が再現されることを明らかにした. しかしながら, 土壤凍結による浸透孔係数の低下は考慮しているものの, 本モデルでは凍結深と浸透孔の開度との関係を明らかにするま

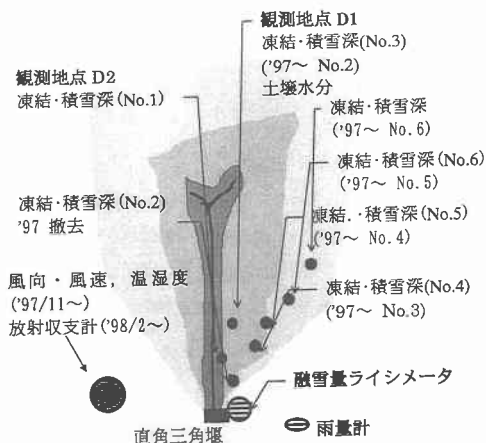
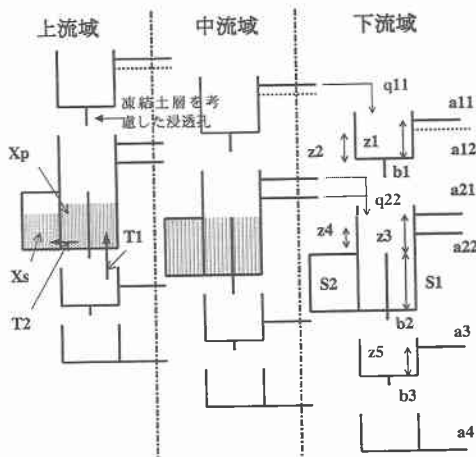


図-1 富里ダム流出試験地の概略図



地帯面積比(上:中:下流域) 9:3:1

図-2 三列四段タンクモデル

Study on snowmelt runoff model in the cold and snowy region with frozen soil by Takashi MATSUMOTO, Hiroshi HAYAKAWA and Kunihide UCHIJIMA

では至っていない。従って、本論文では土壤凍結深予測モデルを融雪流出モデルに組み込むことによって、融雪流出予測の精度の向上を計る。

著者らは、凍結深 $Z(\text{cm})$ を目的変数、積算寒度 $D_c(\text{°C}\cdot\text{日})$ 積算深 $h_s(\text{cm})$ 、積算暖度 $D_w(\text{°C}\cdot\text{日})$ を説明変数とする重回帰分析を行い次式を得ている。

$$Z = \alpha\sqrt{D_c} - \beta\sqrt{h_s} - \gamma\sqrt{D_w} \quad (1)$$

重回帰分析による各回帰係数を表-1 に、予測値の検証結果を図-3 に示す。重回帰式からの凍結深予測結果は土壤の凍結から融解までの経時変化を良好に再現している。

また、土壤凍結の発達には凍結前の土壤の湿潤度が影響するものと考えられる。つまり、土壤の凍結には凍結層下方からの水分供給が必要で、水分がなければ凍結層の成長はできない⁴⁾。この観点から、降雪前の降雨量と最大凍結深の関係を調べてみた。図-4 は 10, 11 月の 2ヶ月間の総降水量と最大凍結深との関係を示しており、かなり良い相関が得られている。この結果から、土壤凍結は晩秋期の降水量によって、たとえ寒さの指標である積算寒度がいくら大きな年でも、その最大値は制約されることになる。したがって、予測式は、総降水量による最大凍結深の条件を勘案して用いる必要がある。

3. 土壤凍結を考慮した融雪流出モデルの改良

(1) 融雪量の算定

融雪量の算定には物理的な算定によって導出する熱収支法と、経験的な算定による Degree Hour(Day)法に大別される。熱収支法では放射収支量、風速等を観測する必要がある。本試験地において 1997 年 11 月よりこれらの項目の観測を開始したので、熱収支法と D.H.法との比較・検証を行う。

図-5 は熱収支に基づいて日単位で表面融雪量を算定した結果である。推定に用いた算定式を表

表-2 熱収支法で用いた算定式

$Q_u = Q_r + Q_A + Q_E$ (2)	$Q_A = 3.95u \cdot T_a^{0.5}$ (4)
$M = Q_u / L_m$ (3)	$Q_E = 2.5 \cdot 10^{-8} L_v (e_0 - e_a) u^{0.5}$ (5)
Q_r : 放射収支量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	M : 表面融雪量 (mm)
Q_A : 顕熱交換量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	u : 風速 (ms^{-1})
Q_E : 潜熱交換量 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	T_a : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)
L_v : 水の気化熱 ($2.5 \cdot 10^6$ (J/kg))	
L_m : 水の融解潜熱 ($3.34 \cdot 10^5$ (J/kg))	
E : 水蒸気圧 (hPa)	

表-1 凍結深の重回帰分析から得られたパラメータ

年度	地点	重相関 R	α	β	γ	10,11月の降雨量 (mm)	可能最大凍結深 (cm)
92年度	斜面域	0.99	2.83	-0.88	-4.06	欠測	
93年度	斜面域	0.98	4.17	-3.56	-4.98	133	81.80
96年度	10m地点	0.92	0.94	-0.31	-2.18	54.5	33.52
97年度	10m地点	0.96	2.25	-0.85	-3.88	84.15	51.75
同	斜面域	0.97	1.11	-0.43	-2.22	84.15	51.75
98年度	10m地点	0.88	0.95	-1.08	-5.18	53	32.60

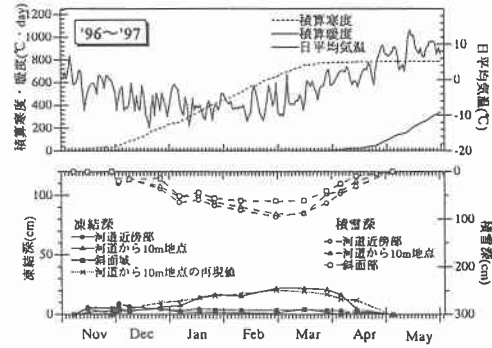


図-3(a) '96年度の積雪深、凍結深、気温関係

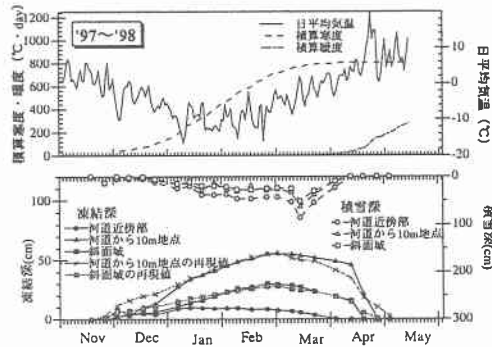


図-3(b) '97年度の積雪深、凍結深、気温関係

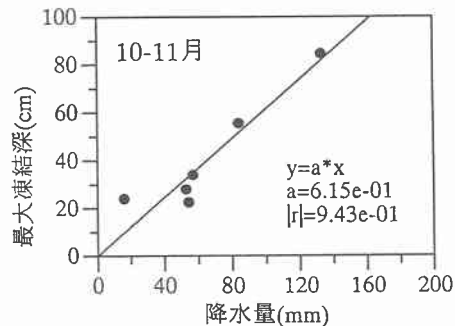


図-4 秋期降水量と最大凍結深の関係

-2 にまとめて示す。この結果から融雪を起こす熱源に放射収支量、顕熱交換量が使われ、潜熱交換量がそれを抑える役割をしていることがわかる。表面融雪量から実際の融雪量への換算は C.C. を考慮する。図-6 はこの D.H. 法で C.C. を考慮して計算した融雪量と比較した結果であり、概ね一致している。したがって、これは従来より本研究で用いてきた D.H. 法の推定結果が妥当なものであり、十分実用的であることを示している。

(2)凍結深予測モデルの導入

本試験地の融雪流出モデルは、土壌水分構造を有する三列四段タンクを用いており、凍結層の発達する上流域、中流域では、それぞれに相当する、一、二列目の第一段タンクの浸透孔を絞り込む必要がある。重回帰分析による凍結深予測モデルによって、凍結深の発達は気温と積雪深との相関が高いという結果が得られているので、凍結深の減少に応じて浸透孔の開度を調節する必要がある。その調節は凍結深が 20cm に減少した時点から開始し、凍結深の減少に応じて浸透孔を徐々に開いていき、土壌凍結が全て融解した時点で、夏期モデルの開度となる 1 次式を適用した。なお、凍結深が 20cm より大きい場合は、夏期モデルの 10% の開度に固定しておく⁹⁾。また、融雪開始時点で土壌凍結深が 20cm 以下の場合には、1 次式の関係をそのまま利用する。

4. 融雪流出の再現計算と考察

前節までの改良を加えた融雪流出モデルを、'97 年、'98 年の融雪流出解析に適用した結果を図-7 に、計算に用いたパラメータを表-3 に示す。'97 年は前年 10,11 月の総降水量が少ないため土壌は乾燥気味でサクションも高く、保水タンクのパラメータ($Xs/S2$)は低い値となっている。'98 年は前年 10,11 月の総降水量が比較的多く湿潤状態にあったため、サクションが低く、保水タンクのパラメータも大きな値となっている。'98 年はまた総降水量が多いため最大凍結深も大きくなると予想される。観測結果からも'98 年は凍結層が発達し、流出形態は融雪初期において土壌凍結のために浸透孔開度が小さくなり、融雪水が浸透し難くなって表面流が支配的になったことが、再現計算結果から読み取れる。また、凍結層がそれほど発達できなかった'97 年の流出形態は、浸透孔の開度が夏期とほとんど同じであるため、融雪水が浸透し易くなり、中間流出が支配的となっている。

この再現計算では $Xs/S2$ と第一タンクの浸透孔

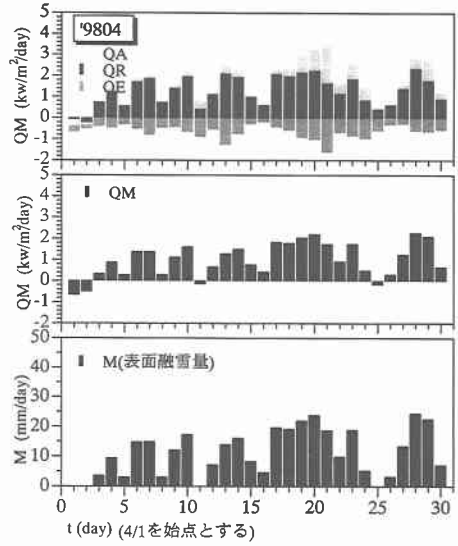


図-5 融雪量の構成

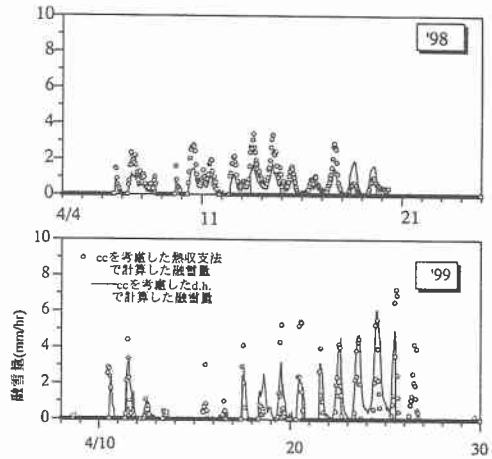


図-6 熱収支法および d.h. 法による融雪量の算定

表-3 再現計算で用いたパラメータ

97年融雪流出				98年融雪流出			
a11	0.05	a3	0.05	a11	0.05	a3	0.01
a12	0.05	b3	0.01	a12	0.05	b3	0.02
b1	0.4	a4	0.003	b1	0.3	a4	0.003
a21	0.05	xs	75	a21	0.05	xs	180
a22	0.05	s1	200	a22	0.05	s1	200
b2	0.1	s2	200	b2	0.2	s2	200

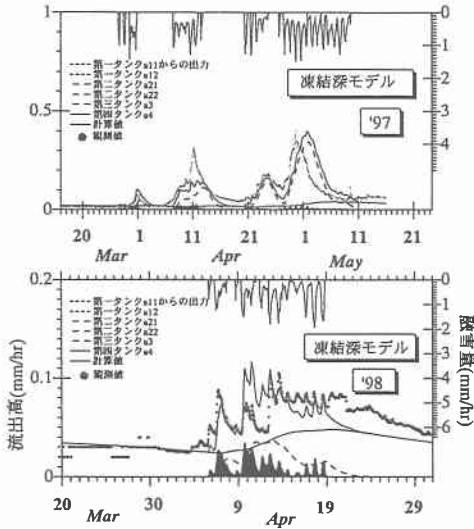


図-7 融雪期の再現計算結果(凍結深モデル)

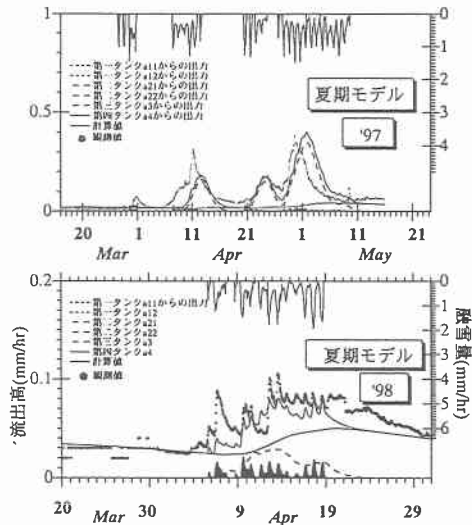


図-8 融雪期の再現計算結果(夏期モデル)

b1 以外は夏期流出モデルのパラメータをそのまま用いており、流出を概ね良好に再現することが出来ている。このことから、融雪流出解析に用いるパラメータは夏期流出モデルのパラメータで十分対応できる。

一方、図-8 は一、二列目第一段タンクの浸透孔の土壤凍結の影響を無視して夏期流出モデルのパラメータをそのまま融雪流出解析に用いて計算した結果である。他の積雪地方の融雪流出解析では、この様に夏期流出モデルを準用することが一般的である。計算結果は、両年とも凍結層が存在するために生ずる融雪初期の表面流成分がこの夏期流出モデルでは全く再現できないことを示している。

以上の解析結果から、富里ダム流出試験地のように凍結層が発達する流域においては、土壤凍結によって地表が難透水性となる流出の再現計算に凍結深モデルが有効であると言える。

おわりに

本研究で得られた知見を要約して本論文の結論とする。

- (1) 融雪流出に影響を与える土壤凍結深は、積算寒度、積雪深、積算暖度のそれぞれの平方根と高い相関性があり、気温と積雪深から土壤凍結の経時変化を十分な精度で予測が可能である。
- (2) 最大凍結深は前年 10、11 月の総降雨量と良い相関が見られる。
- (3) d.h.法によって算定した融雪量は、熱収支に基づいて算定した融雪量とほぼ一致し、実流域への適用が十分可能である。
- (4) 土壤凍結が融雪水を遮断する機構は、凍結深に応じて浸透能を低下させることで評価でき、具体的には第一タンクの浸透孔の開孔比を凍結深の 1 次式で表すことで、本試験地の融雪流出特性を再現できた。

謝辞：本研究は平成 11 年度文部省科学研究費基盤研究(C)(2) (課題番号:09650559,代表:早川博)並びに(財)北海道河川防災研究センターの平成 10 年度研究助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 早川・斎藤・石田・内島：富里ダム流出試験地における融雪流出特性。土木学会北海道支部論文報告集，第 52 号，pp.94-99, 1996。
- 2) 斎藤・早川・内島：融雪流出における凍結土層の影響。土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集第 2 部(A), pp.716-717, 1996。
- 3) 早川・斎藤・内島：凍結土層を有する少雪寒冷地の融雪流出特性に関する研究。水工学論文集，第 42 巻，pp.127-132, 1998。
- 4) 小野・石川・新井・若土・青田：雪氷水文現象 (基礎雪氷学講座第 VI 巻)。古今書院，1994。
- 5) 早川・松本・内島・木口：少雪寒冷地の融雪流出特性—富里ダム流出試験地を例として—。水文・水資源学会研究発表会要旨集，pp.162-163, 1998。
- 6) 成瀬・大浦・小島：気温融雪の野外研究。低温科学物理篇，vol.28, pp.191-120, 1970。