

少雪寒冷地における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

STUDY ON SNOWMELT RUNOFF MODEL IN THE COLD AND SNOWY
REGION WITH FROZEN SOIL

早川 博¹・松本隆志²・内島邦秀³

Hiroshi HAYAKAWA, Takashi MATSUMOTO and Kunihide UCHIJIMA

¹正会員 博(工) 北見工業大学助手 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

²正会員 修(工) 元北見工業大学大学院 工学研究科博士前期課程 (同上)

³正会員 博(工) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (同上)

In Hokkaido, we have often experienced ground surface freezing during the winter. The Tomisato dam experiment basin was set up to clarify the effects of frozen soil on the snowmelt runoff. It is possible in snowmelt season to occur the overland flow at the hillslopes because of reducing infiltration capacity of ground surface by soil freezing. By analyzing observed data, it was pointed out that the swell of long wavelength of hydrograph occurred in the early snowmelt season.

To make clear the effects of frozen soil on the snowmelt runoff, we reconstruct 4×3 zoned tank model, which can consider the spatially distributed frost depth and snow depth at this site, by including the frost dept prediction model. By multiple regression analysis, the frost depth is good relationship between freezing index, snow depth and melting index, and the max value of frost depth is dependent upon the accumulate rainfall at autumn season. As a result, it shows that this improvement is effective to estimate the snowmelt runoff in the cold and snowy region with the frozen soil.

Key Words : Snowmelt runoff, tank model, frozen soil, freezing index, degree hour method

1. はじめに

北海道の道東地域は他の積雪地域と異なり、積雪が少なく、かつ、最低気温が -20°C 以下にもなる、いわゆる少雪寒冷地域であることが知られている¹⁾。この地域では冬期間に土壌が凍結し、ガス・水道などの地下埋設物や道路が凍上現象による破損被害を受けている。また、この土壌凍結は春先の融雪出水にも多大な影響を与えている。凍結土壌が難透水性となるため、この時期に降雨を伴うと、夏期の降雨流出と比べて短期間に流出する異常出水を引き起す。昭和35年3月13日の釧路川での融雪洪水²⁾は、この典型例であろう。

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、流域が土壌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^{3~5)}。その観測結果から、土壌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³⁾、この違いを凍結土層の存在を考慮して構築した融雪流出モデルに適用し、土壌凍結による融雪流出への影響を評価・検討した⁵⁾。本試験地は流域面積が $0.084(\text{km}^2)$ と小さいにも拘わらず流域の積雪水量や土壌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河道から3地帯に分割して各々に土壌水分構造⁶⁾を有する直列4段タンクモデル⁴⁾をあてはめた3列4段タンクモデルを構築した。ここで、土壌水分構造とは浸透も流出もしない拘束水を考慮するために付加されたもので、降雨の初期損失となる雨水を貯留する部分である。これは流域の土壌湿潤状態を表現するもので、土壌水分構造の容量によって、同じ規模の降雨でも流出するか、しないかを自動的に判断する。その結果、融雪流出における土壌凍結の影響は第1タンクの浸透孔開度の減少と土壌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⁵⁾。しかしながら、土壌凍結深と浸透孔、あるいは土壌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土壌凍結深の経時変化予測モデルを構築し、凍結深と浸透孔、土壌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. 流出試験地の融雪流出特性

流出試験地は、北海道東部を北東に貫流してオホーツ

表-1 凍結深推定式のパラメータの重回帰分析結果

年度	地点	重相関 R	α	β	γ	10,11月の降雨量	可能最大凍結深
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

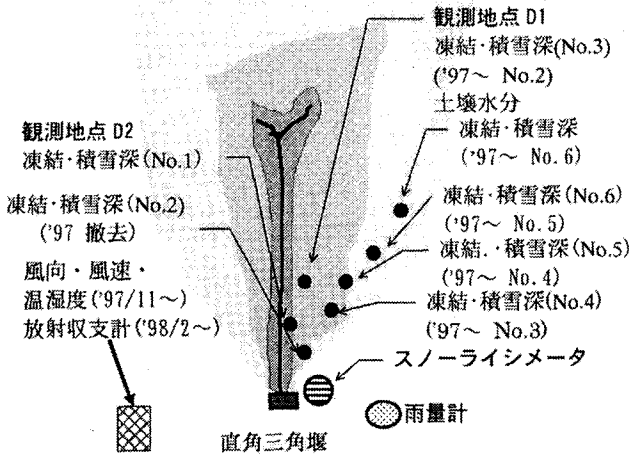


図-1 富里ダム流出試験地の観測体制の概要

ク海に注ぐ常呂川流域のほぼ中央に位置する北見市近郊の富里ダム流域に設けられた(図-1)。試験地の地形特性、観測項目については参考文献(3)～(5)を参照していただきたい。

本試験地は、他の積雪地域にあまりみられない土壌の凍結が特徴的である。1993～1996年までの観測結果から、本試験地での融雪流出は土壌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、土壌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¹⁾。

3. 土壌凍結深の推定

本試験地の融雪流出解析⁹⁾では、入力となる融雪量の算出にCold-Contentを考慮したDegree-hour法を適用し、土壌水分構造を有する3列4段タンクモデルを適用してきた。これまでの解析から、土壌凍結が発達している場合は1, 2列目第1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、土壌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でには至っていない。従って、本論文では土壌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目的とする。

本研究では、凍結深 Z (cm)を目的変数、積算寒度 D_c ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)、積雪深 h_s (cm)、積算暖度 D_w ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{日}$)を説明変数とする重回帰分析を行った。

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

この推定式の第1項は最大凍結深が積算寒度の平方根に比例するという関係⁷⁾を表し、第2項が凍結の増加を防

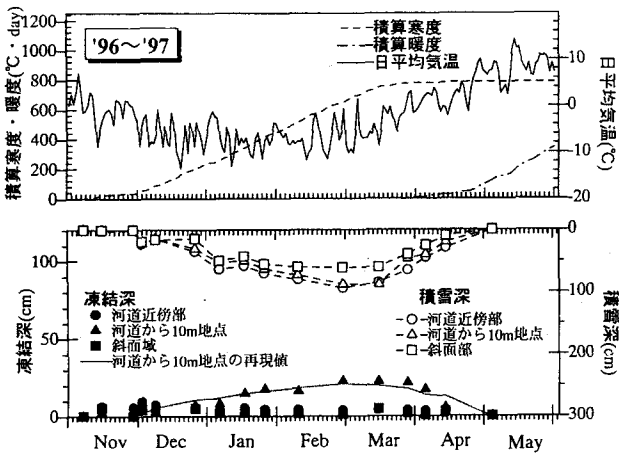


図-2(a) '96年度の積雪深、凍結深、気温

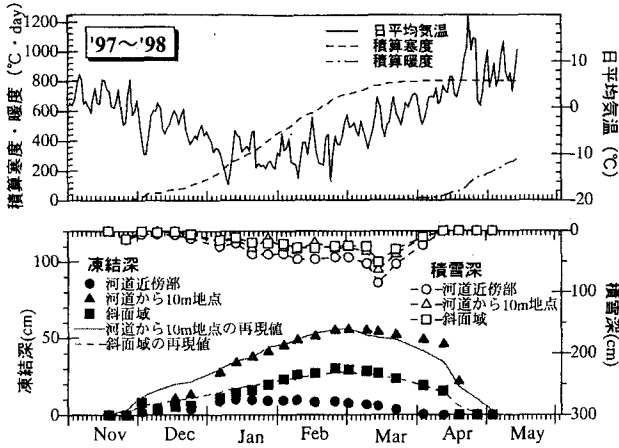


図-2(b) '97年度の積雪深、凍結深、気温

ぐ断熱材としての積雪深、第3項が凍結を融解する熱源である積算暖度の効果を表現している。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-2に示す。重回帰式からの凍結深予測結果は凍結深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、土壌凍結の発達には凍結前の土壌の湿潤度が影響するものと考えられる。つまり、土壌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⁷⁾。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-3は1993～1998年10, 11月の2ヶ月間の総降雨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、

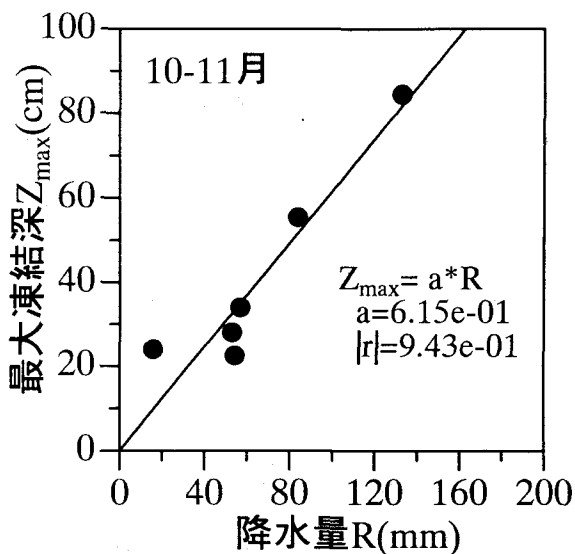


図-3 秋期降水量と最大凍結深の関係
(1993年～1998年)

表-2 夏期流出モデルで同定したパラメータの代表値

a11	0.05	a3	0.01～0.1
a12	0.05	b3	0.02
b1	0.2～0.5	a4	0.003～0.02
a21	0.05	xs	各洪水毎に決定
a22	0.05	s1	200
b2	0.1～0.2	s2	200

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、式(1)の予測式は、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。

4. 降雨流出モデルの改良

降雨流出モデルは、降雨規模や流域の状態によって流出モデルのパラメータが変動するため、一般に普遍的なパラメータを求めることが難しい。本試験地ではこれまで蓄積した観測データを解析し、流出孔、浸透孔の係数は、ほぼ普遍的な値を得ることができた。以下、その結果と考察を述べる。

(1) 3列4段タンクモデルの土壤水分構造の同定

著者らは、これまでに土壤水分構造を組み込んだ3列4段タンクモデルを提案し、本試験地の流出解析に用いてきた⁴⁵⁾。本試験地では図-1に示す、上、中、下流域での融雪量、凍結深の空間分布が地帯ごとに異なっており、それらに対応させるため3列からなるタンクモデルが必要となった。図-4はタンクモデルの構造を示す。これまでの解析では、この土壤水分構造と実際の土壤水分状態

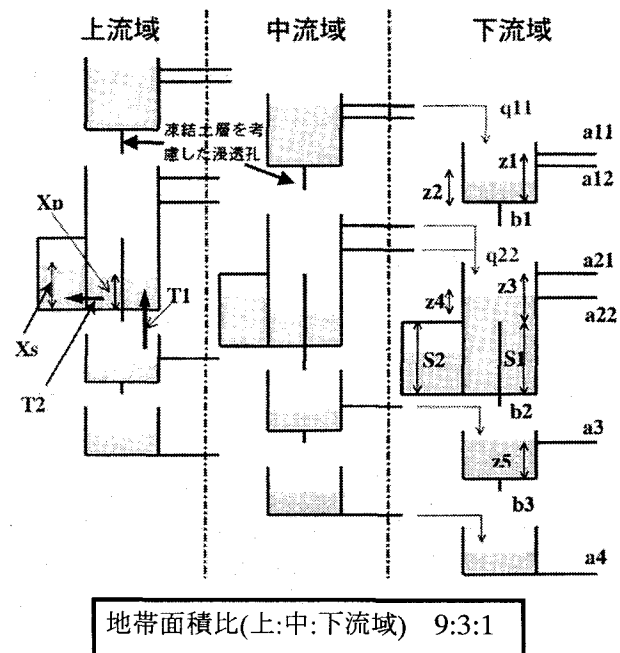


図-4 三列四段タンクモデル

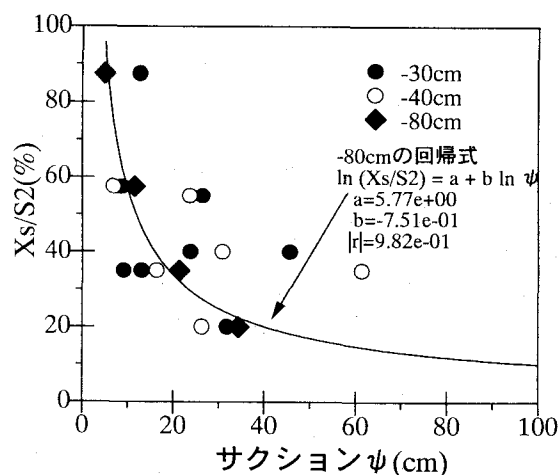


図-5 サクション ψ と X_s/S_2 の関係

との関係が明らかになっていなかった。土壤水分の観測値と土壤水分構造である保水タンクに占める初期貯留量 X_s の比率との関係が明らかになれば、流出解析の際に土壤水分構造パラメータの初期値が与えられることになり、非常に有益である。

本研究では、土壤水分の観測値と保水タンク内の初期貯留量の比率との関係を明らかにするため、3列4段タンクモデルの他のパラメータは大きく変化させないようにして、土壤水分構造パラメータの同定を行った⁸⁾。表-2は1993～1998年までの14例の洪水流出から同定されたパラメータである。タンクモデルの浸透孔と流出孔係数は当初の目的通りほぼ固定された値になり、保水タンクパラメータ (X_s/S_2) だけが各洪水毎に変化していることが分かる。

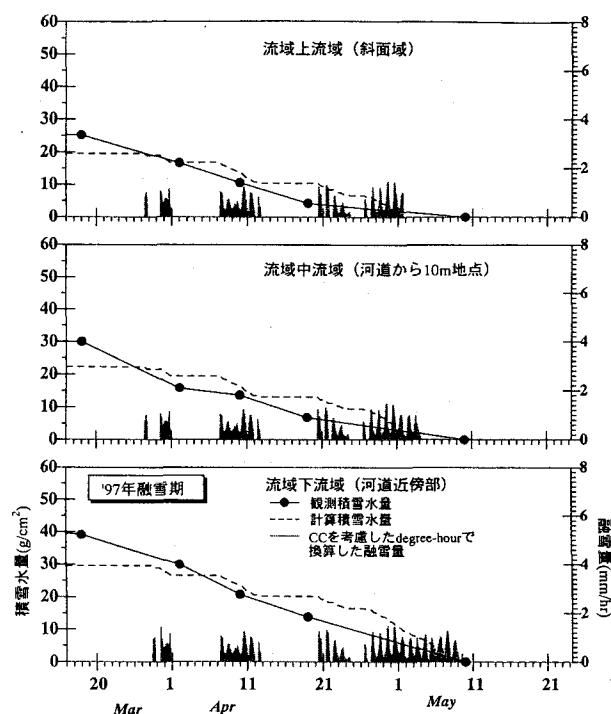


図-6 (a) '97年融雪期の各地帯融雪量

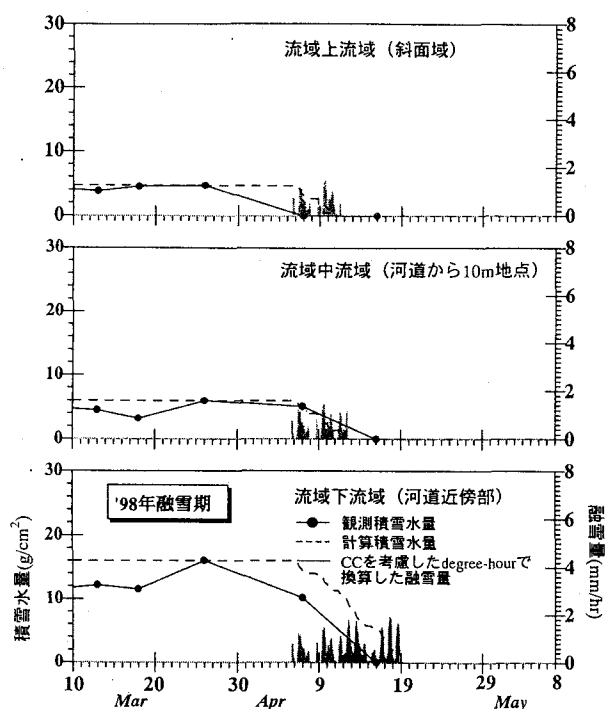


図-6 (b) '98年融雪期の各地帯融雪量

(2) 保水タンクパラメータとサクシジョンの関係

図-5は先に同定した結果から、サクシジョン ψ と保水タンクパラメータ(X_s/S_2)の関係を示している。 X_s/S_2 は保水タンク内の初期貯留高の割合であり、実際の土壌における体積含水率 θ に相当すると考えられる。 θ と ψ の関係で比較的良好に用いられる式として、Brooks-Coreyの式が挙げられる⁹⁾。この式は体積含水率 θ がサクシジョン ψ のべき乗で表される式である。このべき乗関係を、 X_s/S_2 とサクシジョンの関係にもあてはめたと、 X_s/S_2 は地表面下80cmのサクシジョンとの相関が良好であった。したがって、タンクモデルの土壌水分構造の重要なパラメータは、その初期値を土壌水分の実測値から与えられることになる。

5. 土壌凍結を考慮した融雪流出モデルの改良

本試験地の融雪流出モデルは、前述の土壌水分構造を有する3列4段タンクである。本試験地は小試験流域であるが、他の流域と同様に谷筋から尾根にかけての斜面域の積雪水量が空間分布していることが、これまでの観測結果から得られている。したがって、図-1に示す流域の各地帯別融雪量は、図-6に示すように空間分布している。'97年は各地帯とも積雪量が多いため、融雪量の地帯毎の差が少なく、一方、'98年は各地帯毎の積雪深が大きく異なるため、融雪量はかなり異なっていることが分かる。

また、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、1, 2列目の第1段タンクの浸透孔は絞り込みが必要である。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、凍結深の減少に比例し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、夏期モデルの浸透孔開度にすりつく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¹⁰⁾。また、土壌凍結深が融雪開始時点で20cm以下の場合には、1次式の関係を利用する。

次に、夏期洪水モデルにおいて、タンクモデルに付加した土壌水分機構の保水タンクと地表面下80cmのサクシジョンとの相関が認められることから、降雪期前のサクシジョンから融雪流出用の保水タンクパラメータを決定する。ただし、年度によってはサクシジョンの観測値が地表面下50cmまでの結果しかない場合もある。この場合、秋期のサクシジョンの観測値を見ていくと、地表面下40～80cmはほぼ等しいサクシジョン圧を示しているため、40～80cmのサクシジョンは同等と仮定して保水タンクパラメータを決定する。

6. 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

表-3 '97, '98年の再現計算に用いたパラメータ

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

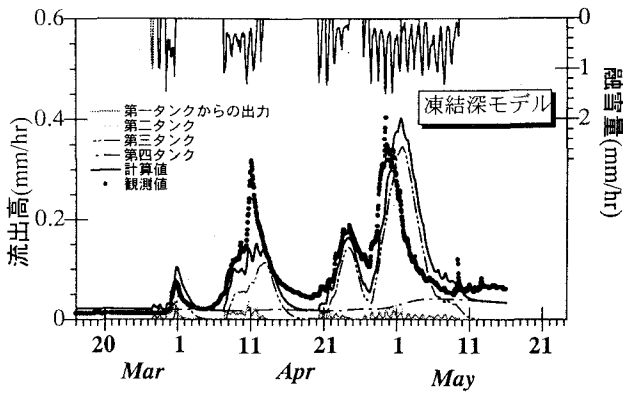


図-7(a) '97年融雪流出の再現結果
(凍結深モデル)

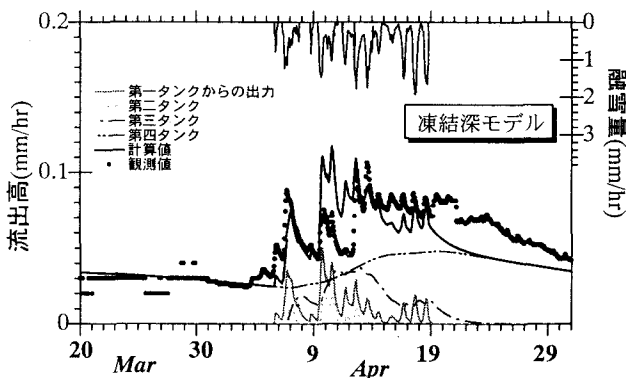


図-7(b) '98年融雪流出の再現結果
(凍結深モデル)

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, 土壌が乾燥気味でサクシオンも高く, 保水タンクのパラメータ (X_s/S_2) も低い値となっている. '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浸透孔が土壌凍結のために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, 中間流出が支配的となっている.

この再現計算では夏期流出モデルのパラメータを用いており, その範囲内で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1, 2列目第1段タンクの浸透孔を土壌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

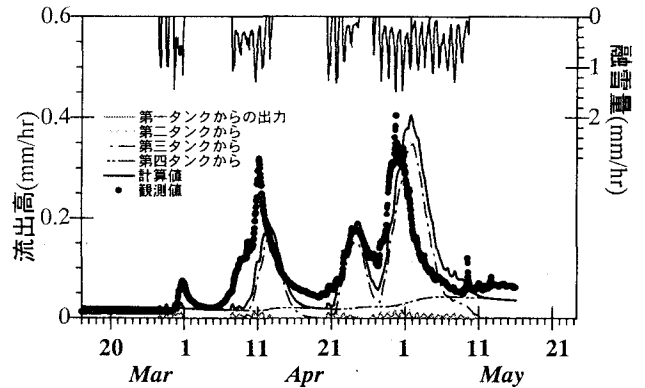


図-8(a) '97年融雪流出の再現結果
(凍結深の影響を考慮せず)

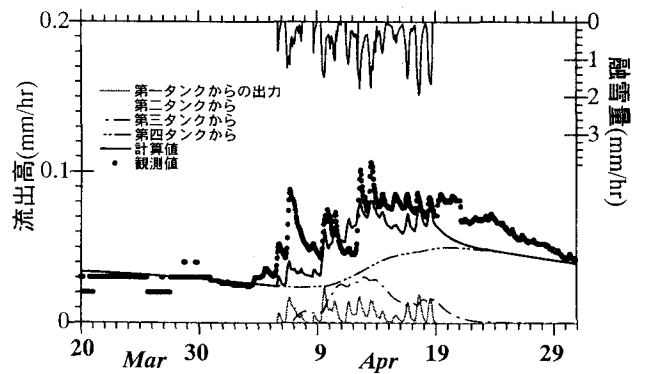


図-8(b) '98年融雪流出の再現結果
(凍結深の影響を考慮せず)

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を, 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, 土壌凍結によって地表面が難浸透性になることを考慮しなければ, 融雪流出の再現が旨くいかないことが再確認された.

7. おわりに

本研究は融雪流出モデルに土壤凍結深の予測モデルを組み込みんだ流出モデルの改良・検討を行った。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みられる。

(3) 本流出試験地に対する降雨流出モデルの普遍的な値を得ることができた。

(4) タンクモデルの土壤水分構造のパラメータ(X_s/S_2)は、地表面下80cmのサクションと相関が高く、サクションの観測値からパラメータの初期値を推定できる。

(5) 土壤凍結が融雪水を遮断する機構は、凍結深に依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)の研究助成を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

1) 内島邦秀・早川博：少雪寒冷地における春先の流出特性，土

木学会北海道支部論文報告集，第44号，pp.223-228，1988。

2) 北海道開発局釧路開発建設部：釧路川治水史，（財）北海道開発協会，1983。

3) 早川博・斎藤靖史・石田哲也・内島邦秀：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。

4) 斎藤靖史・早川博・内島邦秀：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。

5) 早川博・斎藤靖史・内島邦秀：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。

6) 菅原正巳・渡辺一郎・尾崎睿子・勝山ヨシ子：パーソナル・コンピュータのためのタンク・モデル・プログラムとその使い方，国立防災科学技術センター研究報告，第37号，pp. 1-57，1986。

7) 小野延雄・石川信敬・新井正・若土正暁・青田昌秋：雪氷水文現象（基礎雪氷学講座第VI巻），古今書院，1994。

8) 早川博・松本隆志・内島邦秀：富里ダム流出試験地の流出特性について（第3報），土木学会北海道支部論文報告集(A)，第55号，pp.40-45，1999。

9) 日野幹雄・太田猛彦・砂田憲吾・渡辺邦夫：洪水の数値予報〈その第一歩〉，森北出版，1989。

10) 早川博・松本隆志・内島邦秀・木口満：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。

(2000. 10. 2受付)