

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

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

早川 博¹・齋藤靖史²・内島邦秀³

Hiroshi HAYAKAWA, Yasushi SAITO 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 北見市公園町165番地)

²正会員 工修 日本建設コンサルタント(株)東北支店(〒980 仙台市青葉区五橋1丁目6番2号)

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 (〒090 北見市公園町165番地)

This paper describes observations of snowmelt runoff with frozen soil in the Tomisato dam experimental basin. Observed results are indicated as follows: 1) the ground surface soil at the hillslopes was always freezing, 2) there was rarely frozen soil near the stream channel because snowpack serves as a good thermal insulator, 3) the diurnal change of snowmelt runoff was rarely recognized except in the maximum snowmelt season and 4) the swell of long wavelength of hydrograph occurred in the early snowmelt season.

To make clear the cause of above runoff characteristics, this study focuses on the overland flow over the hillslope surface and subsurface flow infiltrated in soil layers. By applying a 4×3 zoned tank model, it shows that the effects of frozen soil on the snowmelt runoff are estimated by the value of model parameters.

Key Words : Snowmelt runoff, tank model, cold-content, frozen soil, degree hour method

1. はじめに

北海道の道東地域(帯広・網走・釧路地方)は本州や北海道道央・道南地域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。この地域では,このような気象条件下にあるため,冬期間に土壌が凍結し,凍上現象による道路や地下埋設物,家屋等の破損被害が広く認知されている。

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。凍結した土壌が難透水性となるため,流域の不浸透域が拡がり一時的な流域の都市化現象を引き起こし,この時期に降雨を伴うと,夏期と比べて短期間に流出する異常出水を引き起こすことになる。少雪寒冷地域である北海道東部地域は,また,年間降水量が800mm以下と全国的にみても小雨地域に属しているため,融雪は水資源を確保する面からも重要であり,異常出水による洪水災害の抑止の面と併せて高精度の流出予測が必要である。

本研究は,少雪寒冷地域に位置する北見市郊外の富里ダム流出試験地を例に,流域に凍結土層を有する場合の融雪流出特性を詳細に検討した。その結果,

土壌凍結の程度によって融雪流出特性に違いが認められた。この違いを検証するために,本研究では凍結土層の存在を考慮した融雪流出モデルを構築し,土壌凍結による融雪流出への影響を定量的に評価することを目的としている。

2. 富里ダム流出試験地及び水文観測

流出試験地は,北海道東部を北東に貫流してオホーツ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。試験地は図-1に示す様に北西向きほぼ長方形の形状で,流域面積が 0.084km^2 ,主河道長が250m,河道の平均勾配が約0.24(傾斜角約13度)である。左右斜面の平均勾配が約0.53(傾斜角約28度)と非常に急勾配で,V字谷の様相を呈している。

試験地は大部分が植林によるトド松(樹齢約30年)で覆われ,河道近傍付近に一部広葉樹がみられる。流域の土壌構成は,表層から約15cmまでは植物の根が混入した黒土からなる A_0 層で覆われている。その下は粒径30~50mmの砂礫を含んだ茶褐色のA層からなり,その厚さは河道近傍で約15cm,尾根方向

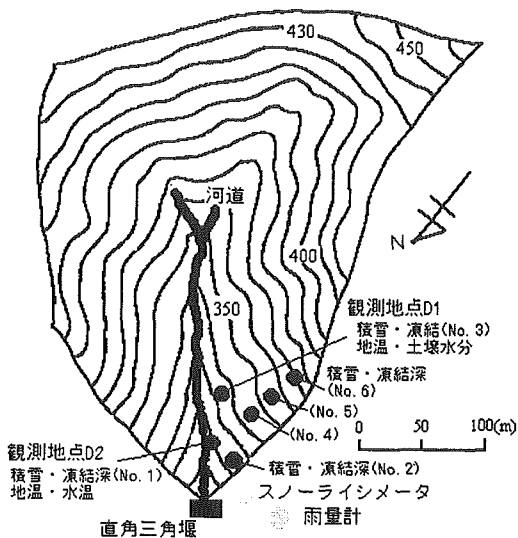


図-1 富里ダム流出試験地

に次第にその厚さを増し、最大で90cmにも達する。なお、河道近傍のA層の下には、更に青白色の粘土を多く含んだ層が厚く存在しているが、斜面域にはみられない。更にその下は、茶褐色のかなり脆弱な基岩が現れ、基岩までの深さは河道近傍が最大で、尾根方向に浅くなっている。

水文観測は1992年12月から開始した。流量は直角三角堰の越流水深を10分間隔で測定し、冬期間も通年観測している。雨量は堰近傍に設置した転倒柵雨量計により同じく10分間隔で測定しているが、冬期間は測定していない。また、三角堰において、気温（地上高1.5m）、地温（深さ10cm地点）及び水温を30分間隔で通年観測している。1994年9月からは図-1のD1地点で土壌水分と地温（深さ10,20,30,40,50,60cm）、D2地点で地温（深さ10,30,50,70,90cm）と水温を30分間隔で計測している。

一方、冬期間は図-1に示す観測地点で、メチレンブルーを用いた簡易凍結深度計により土壌の凍結深度と積雪深を適宜観測している。また、融雪期には三角堰近傍の平坦な場所に設置したスノーライシメーターにより、融雪量を10分間隔で測定し、凍結深観測地点ではスノーサンプラーによる積雪水量調査も適宜実施している。

3. 流出試験地の融雪流出特性

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。これまでの観測結果から、①流域の土壌凍結は、斜面域で最大80cmに達することがあり、融雪期末期に至るまで凍結層が残存する、②河道の近傍では土壌凍結がほとんどみられない、③斜面域の凍結土層によって遮断された融雪水は、大部分が表面流として流下し、河道近傍部の未凍結土層で一旦浸透し、地温によって暖められて押し出される、という特性が報告されている^{1,2)}。

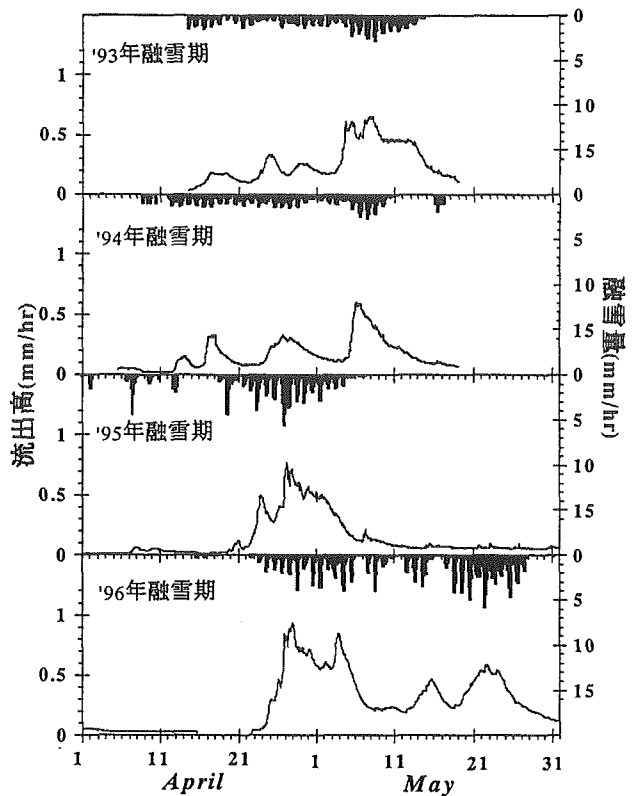


図-2 1993～1996年融雪期の流量ハイドログラフ

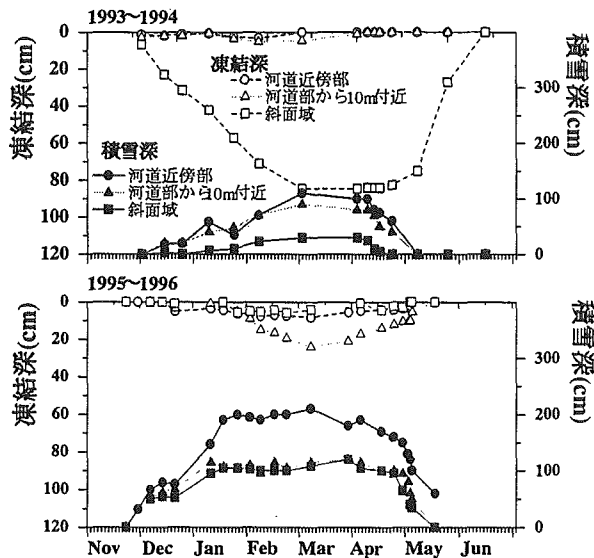


図-3 1994,1996年の凍結深・積雪深変化

また、図-2は'93年から'96年までの融雪期のハイドログラフである。この図をみると、本試験地の融雪流出は大きく二つのタイプに分けることができる。一つは'93, '94年の融雪初期に見られる流量の長周期変動が確認できるタイプであり、もう一方は'95, '96年融雪期のように、この長周期変動が認められないタイプである。

両タイプの流域斜面域の土壌凍結の状況として、図-3は'94と'96年の融雪期における凍結深・積雪深の変化を示している。'94年の凍結深の変化をみると、凍結土層が融雪期末期まで斜面域に残存しているこ

とが分かる。これは積雪前のある程度の深さまで凍結土層が形成され、その後の積雪も少ないために凍結土層が若干増加し、融雪末期まで残存できたものと考えられる。これに対して、'96年は、積雪深が11月下旬から1月中旬にかけて急激に増加しているため、積雪で外気の影響が遮断され、凍結深があまり成長できずに融雪末期まで凍結土層が残存していない。この場合、図-2の'94年にみられた融雪初期の流量の長周期変動が認められず、この変動の原因が凍結土層であることを示唆している。

4. 凍結土層の存在を考慮した融雪流出モデル

融雪流出モデルは、基本的には降雨流出モデルの降水量を融雪量に置き換えるだけで良いと考えられている³⁾ので、最初に基本となる降雨流出モデルを定め、融雪モデルと土壤凍結の影響を組み込んだ融雪流出モデルを構築する。

(1) 降雨流出モデル

本試験地の降水流出特性として、これまでの観測から、①降水終了後、降水のピークにわずかに遅れる流出量の第1ピークと10時間以上遅れる第2ピークが生起する場合がある、②この第2ピークの主成分は深さ50cm以下の土層から流出してくる遅い中間流と地下水流から成り、その生起は少なくとも総降水量が30mm以上必要である、③流量ハイドログラフの減水特性は、流域規模に比してかなり遅く、非常に保水性の高い流域である、ことが報告されている^{1),2)}。この流出特性に対応した降雨流出モデルとして、著者らは一般に第一段タンクに付加されることが多い土壤水分構造³⁾を第二段タンクに設けて流量の第2ピークに対応させ、第一段タンクは早い流出の第1ピークに対応させる並列四段タンクモデルを構築し、良好な再現結果を得ている²⁾。一般的なタンクモデルは、流域を1個のタンクに置き換えることが多いが、並列タンクモデルは、流域の土壤特性などの流域特性が空間的に異なる場合に応じた多成分型モデルで、本試験地のように融雪期に土壤凍結の状態が河道近傍と斜面域で大きく異なる場合に必要となる。

(2) 融雪モデル

融雪は積雪表面で起こり、その融雪水が積雪層内を流下して地表面に到達する。降雨流出モデルを融雪流出解析に適用する場合、降水量に相当する地面到達融雪量を与えなければならない。雪面融雪量の算定モデルには、大別すると積雪層の熱収支観測に基づいた熱収支モデルと気温のみから算定するDegree day(Degree hour)法がある⁴⁾。本試験地では、気温(T :hr)のみの観測であるので、Degree hour法により雪面融雪量(W :mm/hr)を算定すると、観測結果から

$$W = 0.299(T + 0.089) \quad (1)$$

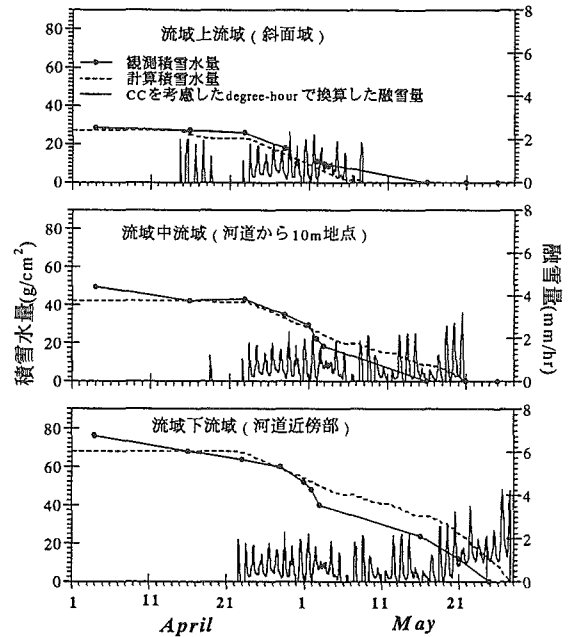


図-4 '96年の各地点での積雪水量・融雪量変化

の関係が得られている¹⁾。また、本試験地では夜間に気温が低下すると、日中に一旦融解した融雪水が積雪層内で再凍結し、次の日の気温上昇の初期は再凍結した融雪水の融解に熱量が費やされるために、雪面の融解が遅れることになる。この再凍結を考慮するためにCold-Content⁵⁾なる係数を雪面融雪量の算定に取り入れた。

$$CC = c_i \times \rho_s \times h_s (0 - \theta_p) / (79.7 \rho_w) \quad (2)$$

ここで、 CC : Cold-Content, c_i : 氷の比熱, ρ_s : 雪の密度, h_s : 積雪深, θ_p : 積雪温度である。このCold-Contentは、積雪温度をある温度から 0°C に上昇させるのに必要な熱量を 0°C の水から奪った時に、 0°C の水をどれくらいの深さまで凍結させるかを表している。即ち、気温が 0°C 以上であってもCold-Contentが正の場合、積雪表面の温度の上昇に熱量が費やされ、水を融解する熱量は残っていないので、融雪は起こらないことになる。Cold-Contentは凍結深と同じように積算値で示されるために、計算の開始時期を何時にするのかでその効果が大きく異なる。このCold-Contentの開始時期はライシメータでの融雪量の実測結果をもとに、各年毎に試行錯誤して決定した。

次に、本試験地規模の流域では降水量の空間的な違いは無視できるが、スノーサーベイによる積雪量の経時変化を調べると、流域の大部分を占めている流域斜面域(上・中流域)では、スノーライシメータを設置した河道近傍よりかなり早い時期に融雪が終了しており、融雪量の空間分布を考える必要がある。図-4は'96年融雪期におけるCold-Contentを考慮して算定した各地点の融雪量と積雪水量である。ここで、積雪水量は1時間毎に積算した融雪量を各地点の積雪水量から差し引き、積雪水量が無くなるまでの計算を行った。積雪水量の実測値や融雪の終

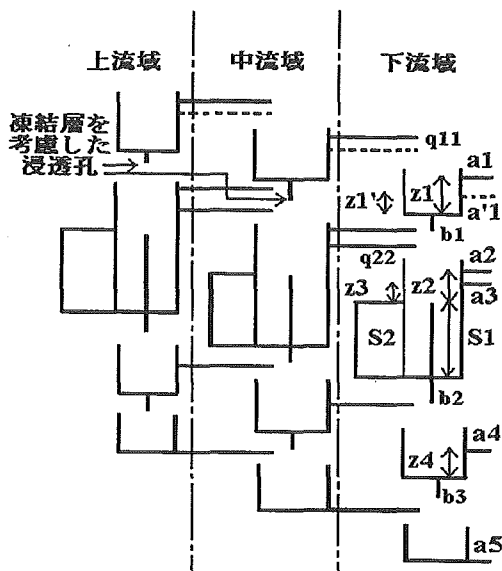


図-5 三列四段タンクモデル

了時期の計算結果との対応は各地点とも良好であり、融雪量の算定がほぼ妥当であると考えられる。

(3) 三列四段タンクモデル

融雪量や凍結土壌の空間分布に対応するために、本研究では図-5の三列四段タンクモデルを構築した。ここで、下流域の河道の左、右岸約10~15mの範囲を河道近傍と考え、この地帯面積を1とおくと、このモデルの地帯面積比は上流域から9:3:1になる。既に、本試験地では並列四段タンクモデルに積雪層内の融雪水の遅れを考慮するタンクを付加した融雪流出用のタンクモデルを提案している⁶⁾。中尾ら⁷⁾は融雪水の積雪層内の遅れの推定に、貯留関数法を適用している。本試験地にも貯留関数法を適用し、Degree-hour法による雪面融雪量とライシメータの融雪量から、一日毎に貯留係数、貯留指数と流出の遅れ時間を同定した。その結果、貯留指数は大部分がほぼ0になって、入力と出力の波形に大差がなく、流出の遅れ時間は積雪深によっても変わるものの約3時間程度で、単に遅れ時間だけを考慮するだけで良いという結果が得られた。したがって、ここでは融雪量の遅れに対応するタンクは特に設けず、第一段タンクへの入力となる地面到達融雪量は、雪面融雪量に上記の流出の遅れ時間だけを考慮して与えた。尚、この遅れ時間は積雪深に関係するので、積雪水量の減少に伴って遅れ時間を小さくし、融雪末期での遅れは無いものとした。この河道近傍のライシメータ設置地点での遅れ時間と積雪水量の関係が、中流、上流域の地面到達融雪量の遅れ時間の算定にも準用された。

次に、凍結土層の影響を融雪流出モデルに取り入れるため、①凍結土層は融雪水の浸透を妨げるので、第一タンクの浸透孔を絞り込む、②第二タンクに付加した土壌水分構造は土壌が部分的に凍結するため飽和容量が低下する、の2点である⁸⁾。'93、'94年融雪期のように流域斜面域の凍結土層の影響が大きい

表-1 夏期洪水解析に用いたパラメータ

第一タンク	第二タンク	第三、四タンク	土壌水分構造				
a1	0.015	a2	0.1	a4	0.005	S1	90
a1'	0.045	a3	0.025	b3	0.002	S2	100
b1	0.3	b2	0.003	z4	10	k1	0.1
z1	4	z2	40	a5	0.001	k2	0.2
z1'	0	z3	0				

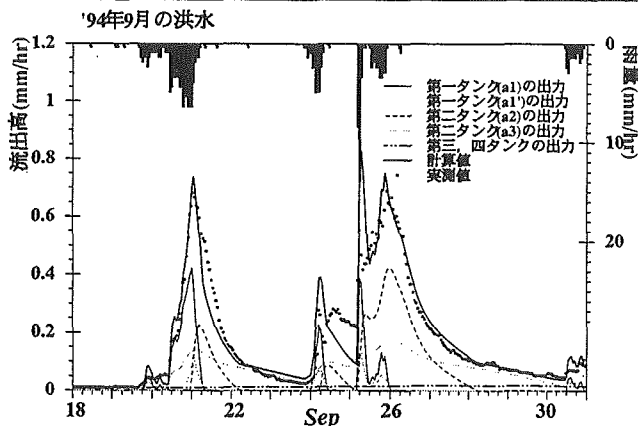


図-6 夏期洪水の再現計算結果

場合には、斜面域に対応する一、二列目の第一段タンクの浸透孔を絞り込むことによって、第一タンクの側方流出孔からの表面流成分(図-5中q11)が増加することになる。なお、このモデルを降雨流出解析に用いる場合は、第一段タンクの側方に早い流出成分に対応する流出孔(点線で表示)を新たに付加することによって対応させることができる。

5. 三列四段タンクモデルによる再現計算

(1) 夏期洪水流出

本モデルは、まず夏期の洪水に適用して、三列四段タンクモデルの流出パラメータを同定した。ただし、地表面の状態が融雪流出と大きく異なるため、第一段タンクに早い表面流出に対応する流出孔(a'1)を設けている。なお、降雨は流域一様とし、同定した結果を図-6に示す。これは'94年9月19日から21日にかけての洪水と、それを先行降雨とした24日から26日にかけての洪水である。流出高のピークが約0.7(mm/hr)で、これまでの観測結果では最も融雪流出に近いものである。計算結果は後半のピーク付近にやや差があるものの、ほぼ一致している。表-1は夏期洪水時におけるパラメータの同定結果である。夏期の洪水流出においても第一段タンクに側方流出孔(a'1)を加えることによって、融雪流出用に構築したモデルはうまく再現しており、この三列四段タンクモデルが本試験地の妥当なモデルの一つであると言える。

(2) 融雪流出

a) '93、'94年型融雪流出

図-7は融雪初期において凍結層の影響が大きいと考えられている'93、'94年融雪期の、三列四段タンク

表-2 '93,'94年融雪期再現計算で用いたパラメータ

第一タンク		第二タンク		第三, 四タンク		土壌水分構造	
a1	0.1	a2	0.04	a4	0.012	S1	45(90)
a1'	0.0	a3	0.03	b3	0.0045	S2	50(100)
b1	0.3	b2	0.01(0.015)	z4	20	k1	0.1
z1	12	z2	90	a5	0.0008	k2	0.2
z1'	0	z3	4				

表-3 '95,'96年融雪期再現計算で用いたパラメータ

第一タンク		第二タンク		第三, 四タンク		土壌水分構造	
a1	0.1	a2	0.12	a4	0.012	S1	90
a1'	0.0	a3	0.01	b3	0.0045	S2	100
b1	0.3	b2	0.02(0.008)	z4	20	k1	0.1
z1	15	z2	60	a5	0.0008	k2	0.2
z1'	0	z3	3				

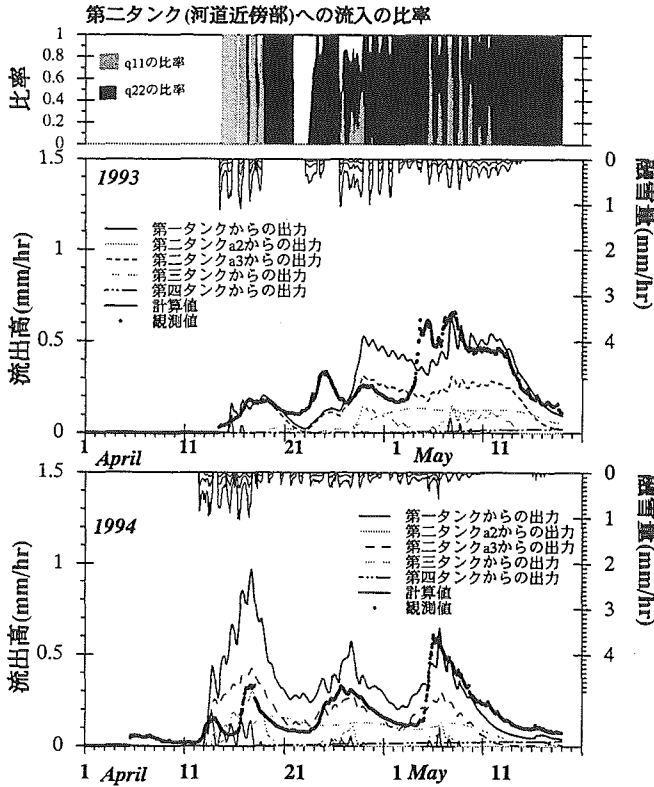


図-7 '93,'94年融雪期再現計算結果

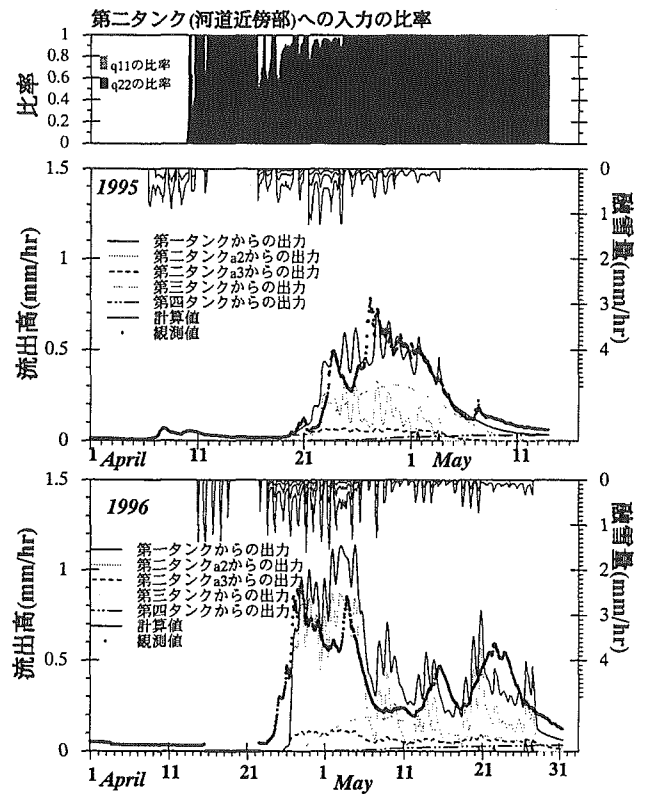


図-8 '95,'96年融雪期再現計算結果

クモデルを用いた再現計算結果である。各列の入力となる雪面融雪量は第3節で述べたように積雪水量の空間分布を考慮して各列毎に融雪量を算定している。まず、夏期の洪水流出について同定したパラメータを参考にして、'93年融雪期におけるパラメータが同定された。表-2が、'93年のパラメータの同定結果である。凍結土層の発達している流域斜面域に対応する一、二列の第一段タンクの浸透孔は、融雪初期で夏期洪水パラメータの10%に絞り込み、積算暖度に比例してこの浸透孔を拡げていき、融雪終了時点で80%に設定している。更に、土壌水分構造も夏期洪水に比べ半分になっている。この設定は、並列タンクモデルによる検討結果で最も相関の良い設定値であった⁸⁾。一方、凍結土層の影響が無視できる河道近傍部に相当する三列目の第一段タンクは、浸透孔の絞り込みを行わず、土壌水分構造の飽和容量も夏期洪水と同じにした。表-2の土壌水分構造()内のパラメータが三列目の値である。'94年は、'93年と同じパラメータを用いた結果、融雪初期の段階で実測流量よりかなり大きな流出を示した。そのため、第二段タンクの浸透孔(表-2中b2()内の値)を拡げ、融雪末期のピーク部分が一致するように調整

した。これは斜面域の凍結土層の影響を考慮する必要のある融雪流出において、特に第一タンクのパラメータを同じ条件に設定して流出特性を比較するためである。

両年の計算結果から融雪初期の流量の長周期変動成分は、河道近傍部の第三列の第二タンクからの出力が主成分であることがわかる。'93年についてその第二段タンクへの入力の比率を図-7に併記している。この図は融雪初期に斜面域で凍結土層により遮断された融雪水が表面流として流下し(図-5中q11)、河道近傍部で浸透して第二段タンクから流出していることを示している。また、'94年融雪初期において、'93年に比べるとかなり過大に流出しており、凍結土層の影響を受ける第一段タンクのパラメータの値は、凍結の状況に応じて変える必要があることを示唆している。この点は今後の課題である。

b) '95,'96年型融雪流出

'95,'96年融雪期は斜面域の凍結土層の影響が無視できると考えられるタイプで、図-8にその再現計算結果を示す。この両年の融雪流出は融雪初期においても凍結土層がそれほど発達していないので、凍結土層の影響を無視できるものとして斜面域の浸透孔

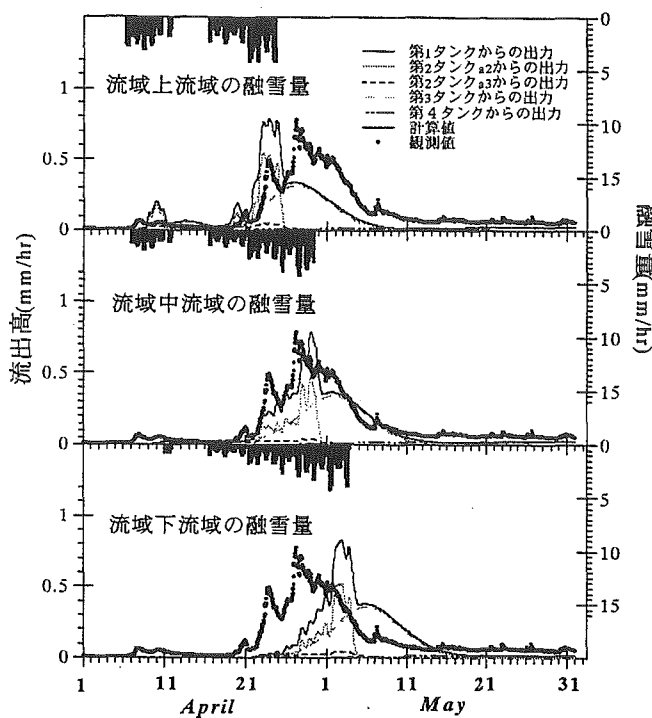


図-9 '95年融雪期における融雪量の空間分布の影響

の絞り込みと土壌水分機構の容量の低下は考えていない。この再現計算では '95年のパラメータを最適同定し、その結果を '96年の再現計算に用いた。その結果、第三段タンクからの出力が過大になってしまったので、第二段タンクの浸透孔(表-3の()内の値b2)を絞ることによって、融雪末期の流出の傾向を一致させた。

両年の融雪流出の特徴は前者のタイプと比較すると、融雪初期にはほとんど流出がなく、融雪の最盛期に入ると急激に流出量が増加することである。斜面域の凍結土層の影響が無視できる場合、流域の大部分が未凍結域となるので、融雪水はほとんど地中に浸透してしまう。図-8中の'95年における河道近傍部の第三列の第二段タンクへ流入する入力成分の比率をみると、斜面域の第二列の第二タンクからの流出(図-5中q22)が大部分を占め、'93, '94年で卓越していた斜面域の第一段タンクからの流出(図-5中q11)がこの場合ほとんどみられないことが分かる。更に、再現計算結果の各タンクからの出力をみると、浸透した融雪水による第二段、第三段タンクからの流出成分が支配的である。また、凍結土層の影響がない場合にはほとんど表面流が起こらず、夏期の洪水流出と同程度のパラメータ値で実測流量を再現出来ることを示している。

c) 融雪量の空間分布の影響

融雪量の空間分布が本試験地の融雪出水にどの程度影響しているのか、検討を加える。図-9は '95年融雪流出について、各地帯毎に算定した融雪量を流域一様と仮定して入力した場合の計算例である。上が上流域の融雪量を中流・下流の地帯の入力とした結果で、以下、中流域、下流域の融雪量を入力した場合である。その結果、実測流量の4月24日頃の流

量の第1ピークは上流域の融雪流出から形成されていることが分かり、次の27日頃の第2ピークは中流域の融雪流出から成ることが理解できる。しかし、両方の流量ピークを同時に再現するには、図-9で示したように各地帯毎融雪量の空間分布を考慮しなければならない。したがって、本試験地規模の小流域においても、融雪量の空間分布が流出に与える影響は大きい。

6. おわりに

最後に、以上の検討から得られた結論を要約する。
 ① '93, '94年融雪期初期に見られた流出量の長周期変動は、流域の大半を占める上流域、中流域において、下流域に比べて早く生じた融雪水が凍結土層上を流下する表面流によるものであると推定できる。
 ② '95, '96年融雪期の凍結土層があまり発達していない場合は、上流域、中流域の早い時期の融雪流出は大部分が地中に浸透し、その浸透流が河道近傍部に集中してまとまった大きな流出となる。
 ③ 本試験地規模の小流域は、降雨流出では降雨の空間分布をほとんど考慮する必要がないが、融雪流出では地形特性による積雪水量の偏った分布や、流域の立地条件による日当たり等の環境の違いによって生ずる融雪量への影響を考慮する必要がある。

謝辞：本研究は平成9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・内島：富里ダム流出試験地の流出特性について、土木学会北海道支部論文報告集，第50号，pp.324-329，1994。
- 2) 早川・内島：富里ダム流出試験地の流出特性について(第2報)，土木学会北海道支部論文報告集，第51号，pp.60-63，1995。
- 3) 菅原正巳：続・流出解析法，共立出版，1979。
- 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) 中尾・佐渡：積雪の含水率，温度を考慮した融雪モデルの研究，土木学会北海道支部論文報告集，第45号，pp.347-352，1989。
- 6) 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。
- 7) 中尾・佐渡：融雪水の積雪内浸透に対する貯留関数法の適用，土木学会北海道支部論文報告集，第46号，pp.287-292，1990。
- 8) 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。

(1997.9.30受付)