

II - 14

富里ダム流出試験地の融雪流出解析

北見工業大学大学院 学生員 斎藤 靖史
 北見工業大学工学部 正員 早川 博
 北見工業大学工学部 正員 内島 邦秀

1. はじめに

融雪流出は、本試験地の位置する北海道東部の様な少雪寒冷地域において水資源を確保することができる反面、異常出水による洪水災害にもつながり、高精度の流出予測が必要である。このためにも融雪流出のメカニズムを把握することが重要である。このメカニズムの解明を目的として、著者らは観測結果を基にした流出経路の推定からタンクモデルを構築し、本試験地の流出解析を試みてきた^{1)~4)}。

前回までの報告で、本流出試験地では'93, '94年融雪初期において、流量ハイドログラフにある周期の特徴的なうねりが認められた^{2),3)}。この原因が融雪期を通して存在が確認された流域の凍結土層にあると仮定し、タンクモデルの流出パラメータと凍結土層の存在の影響を関連づけることによって、この仮定を立証することができた⁴⁾。しかし、本試験地の立地条件から、積雪深の少ない上流域の融雪の方が河道近傍部よりも早く融雪が終了してしまうことが判り、本試験地のような小流域(8.4ha)でも融雪量の空間的な偏りを考慮する必要性が指摘された。そこで、今回は流域を地帯に分割し、各々の地帯の融雪量を Degree-hour 法から算定することによって、融雪量が空間分布していることを考慮した融雪流出解析を試みる。尚、融雪量の算定には、Cold-Content⁵⁾と呼ばれる積雪層内の融雪水の再凍結を考慮した。

2. 試験地の融雪流出特性

本試験地は、他の積雪地域とかなり異なる特性を有している。①斜面域において融雪期末期に至るまで凍結層が残存することがある、②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流出経路を経る、という特性である^{2),3)}。図-1は'93年から4カ年の流量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年融雪期の融雪初期に見られる長周期のうねり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、このうねりが融雪初期に確認できないタイプである。両者の流出の相違を流域斜面域の凍結土層と対比して考える。図-2は'94, '96年融雪期における凍結深・積雪深の変化である。'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たことと、その後の斜面域の積雪も少ないので凍

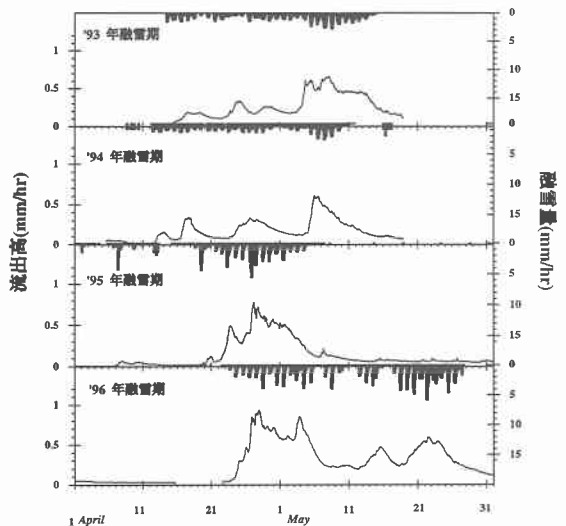


図-1 四ヶ年の流量ハイドログラフ

結土層が残存できたと考えられる。これに対して、'96年融雪期では積雪深が11月下旬から1月中旬にかけて急激に増加している。これは、凍結土層が成長する前に積雪で外気の影響が遮断されたために、凍結深があまり増加できず、融雪末期には斜面域にも凍結土層が残存していない。この場合、前者にみられた融雪初期の流量のうねりが認められず、うねりの原因が凍結土層であることを示している。

3. 三列四段タンクモデルの構築

3.1 モデル再構築の目的

前報までの流出解析では、流出経路を考へて凍結土層の存在する流域斜面域と未凍結土層の河道近傍部とに二分した並列四段タンクモデルを構築した²⁾。このモデルは、本試験地の夏期洪水の特性である比較的早い第1ピークへの立ち上がりとし、流出の骨格をなす流量の第2ピークがかなり遅れて生起する流出特性に対応するため、一般に第一段タンクに付加されることが多い土壌水分構造を第二段タンクに設け、第一段タンクは早い流出に対応させている。このモデルを融雪流出に準用したところ、融雪量の積雪層内の遅れと凍結土層への浸透が問題となり、第一段タンクの上段に積雪層内の融雪の遅れに対応させるタンクを設け、更に、凍結土層の影響は第一段タンクの浸透孔を絞り込むことと土壌水分構造の飽和容量を低下させることとした^{3,4)}。この結果、融雪初期に見られたうねりが凍結土層の影響であることを定量的に評価することが出来た。しかし、実測流量との対応を見ると、所々に流量ハイドログラフの波形に違いがみられ、改善の余地が残されていた。この原因として、入力である融雪量として最下流部のライシメータで測定された融雪量を用いたことが挙げられる。図3は'95、'96年融雪期における積雪水量の変化である。この図からライシメータ設置地点の河道近傍部は、流域の中で最も積雪水量の多い地域であり、この地点を流域全体の代表値と考えるのは問題がある。つまり、融雪流出解析では、降雨量と違って積雪水量の空間分布を考慮する必要があり、流出モデルもこれに対応できるように再構築する必要がある。

3.2 融雪量の空間分布

流域の融雪量分布を推定するために、まず Degree-hour 法によって積雪表面融雪量を求める。その際、融雪水の積雪層内での再凍結を考慮するために Cold-Content⁵⁾なる係数を導入した。

$$CC = c_i \times \rho_s \times h_s (\theta - \theta_p) / (79.7 \rho_w) \quad \dots(1)$$

ここで、CC: Cold-Content, c_i : 氷の比熱, ρ_s : 雪の密度, h_s : 積雪深, θ : 積雪温度である。式(1)に示す 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 の水をどれだけ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使われ、氷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。本来、積雪表面での融雪量は雪面における熱収支を考慮しなくてはならないが、観測項目として気温、積雪密度及び積雪深しかないので、この

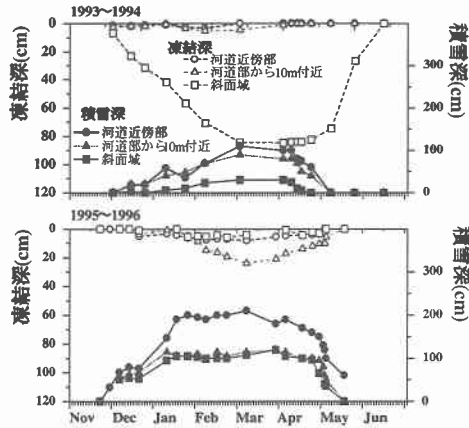


図-2 '94、'96年凍結深・積雪深変化

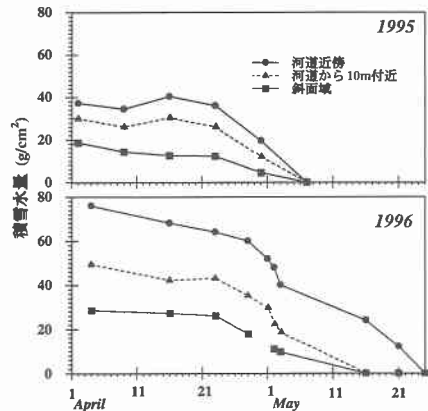


図-3 各地点ごとの積雪水量変化

ような方法を用いた。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。更に、算定した融雪量を各地点の積雪水量から差し引いていき、積雪水量が無くなった時点で融雪を終了させた。図-4 は '96 年融雪期における Cold-Content を考慮した各地点の融雪量である。この図から、流域の大部分を占める流域斜面域は、ライシメータがある河道近傍の観測融雪量よりかなり早い時期に終了していることになる。

3.3 三列四段タンクモデル

再構築したモデルは、前節の融雪量の空間分布に対応できる図-5 の三列四段タンクモデルである。このモデルの地帯面積比は上流域から 9:3:1 に定めた。これは本試験流域の河道長が 250m であり、積雪の多い地帯が河道の左岸、右岸約 10~15m の範囲と考えると、この部分の面積が設定した河道近傍の地帯面積にほぼ相当している。

前報のモデルでは融雪流出用に積雪層内の遅れのタンクを付加した、実際には並列五段タンクモデルになっていたので、その取り扱いを考慮すると、あまり複雑な多段タンクモデルは望ましくない。中尾ら⁹⁾は融雪水の積雪層内の遅れの計算に、貯留関数法を適用している。本試験地に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、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、貯留指数は大部分がほぼ 0 付近になって、入力と出力の波形に大差がなく、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設けずに、第一段タンク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求めた。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。このライシメータの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準用された。

また、前報のモデルの第一段タンクは、洪水流出の早い流出成分を主に対応させていたが、今回は融雪流出を主に考えて、図-5 に示すような側方流出孔が一個のモデルとした。'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、側方流出孔からの表面流成分が増加することになる。

一方、このモデルを降雨流出解析に用いる場合は、第

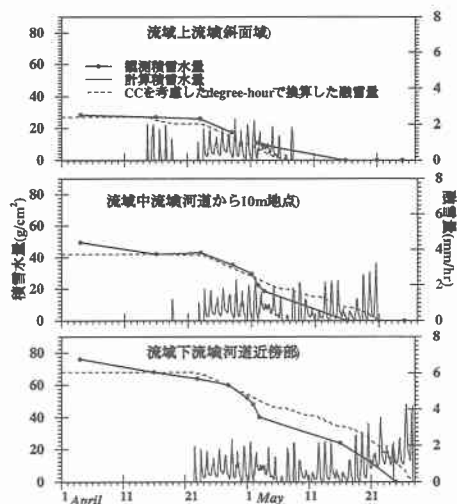


図-4 各地点での積雪水量・融雪量変化

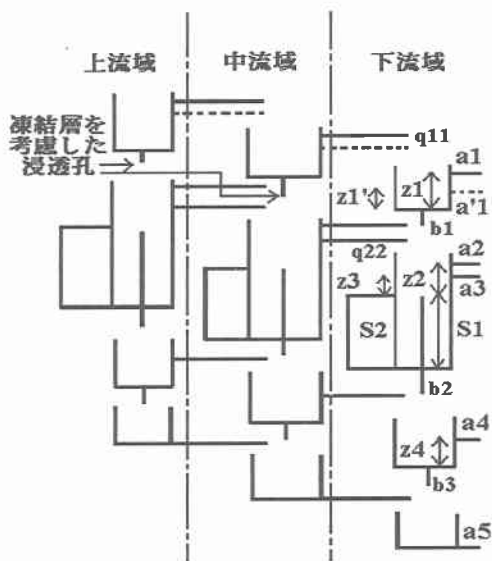


図-5 三列四段タンクモデル

一段タンクに早い流出成分に対応する側方流出孔（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。

4. 三列四段タンクモデルによる再現計算

4.1 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ている。その結果を図-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。この結果から、降雨量分布は流域一様と考えて問題ない。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ほぼ妥当なモデルの一つであるといえる。

4.2 融雪流出

4.2.1 '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'93, '94年融雪期の、三列四段タン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積雪量の空間分布を考慮して各列毎に融雪量を算定した。まず、前節で同定した洪水流出の結果を参照して、'93年融雪期における流出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浸透孔を上げていき、融雪終了時点で80%に設定している。この絞り込みの割合は、並列モデルで最も相関の良かった値を用いた^{3),4)}。更に、土壌水分構造も夏期洪水に比べ半分になっている。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、その絞り込みを行わず、土壌水

表-1 夏期洪水解析に用いたパラメータ

| 第1タンク | | 第2タンク | | 第3, 4タンク | | 土壌水分構造 | |
|-------|-------|-------|-------|----------|-------|--------|-----|
| a1 | 0.15 | 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 | 0 | k1 | 0.1 |
| z1 | 4 | z2 | 40 | a5 | 10 | k2 | 0.2 |
| z1' | 0 | z3 | 0 | | | | |

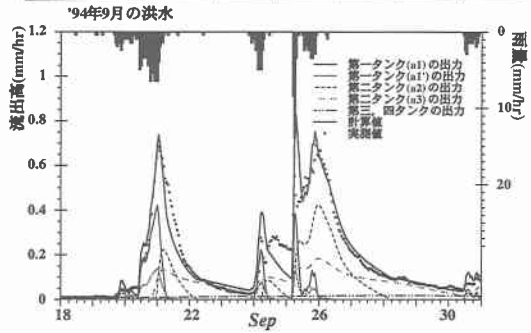


図-6 夏期洪水の再現計算結果

表-2 '93, '94年融雪期再現計算で用いたパラメータ

| 第1タンク | | 第2タンク | | 第3, 4タンク | | 土壌水分構造 | |
|-------|-----|-------|-------------|----------|--------|--------|---------|
| a1 | 0.1 | a2 | 0.04 | a4 | 0.012 | S1 | 45(90) |
| a1' | 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 | | | | |

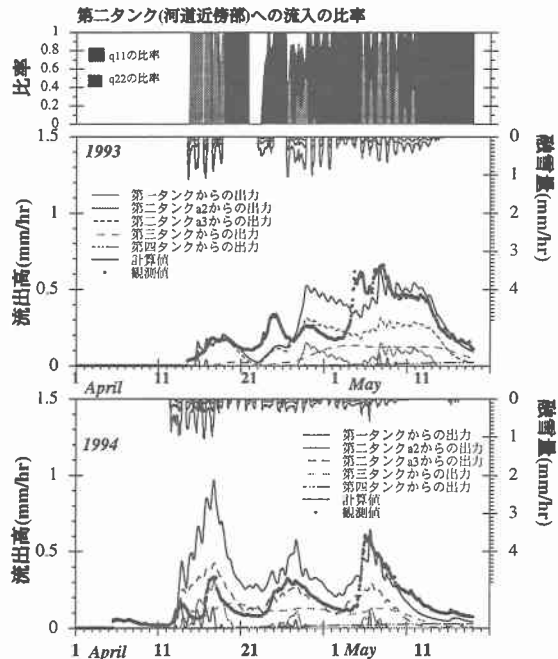


図-7 '93, '94年融雪期再現計算結果

分構造の飽和容量も夏期洪水と同じにした。なお、表-2 の土壌水分構造()内のパラメータは河道近傍部の第3列の値である。'94年について、'93年のパラメータをそのまま用いた結果、融雪初期の段階で特に大きな流出を示してしまっ。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のタイプにおいて、特に第一タンクのパラメータが同じ条件での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うねりの成分は、河道近傍部の第三列の第二段タンクからの出力が主である。'93年についてその第二段タンクへの入力比率を図-8に併記した。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のあることを示唆している。

4.2.2 '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おらず、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。この再現計算も'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てみた。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るようにした。

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段タンクからの流出(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が伺える。

5. 考察

本試験地での融雪流出解析は、これまで非常に小流域であることから降雨の空間分布と同様に融雪量も流域一様と考えてきた。しかし、今回は小流域においても地形特性によって生ずる積雪水量の偏りや、本試験地の様に上流域から融雪が始まり、終了も早いという立地条件による融雪量の特性を反映させることを目的

表-3 '95, '96年融雪期再現計算で用いたパラメータ

| 第1タンク | 第2タンク | | 第3, 4タンク | | 土壌水分構造 | | |
|-------|-------|----|-------------|----|--------|----|-----|
| a1 | 0.1 | a2 | 0.12 | a4 | 0.012 | S1 | 90 |
| a1' | 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 |
| a1' | 0 | a3 | 3 | | | | |

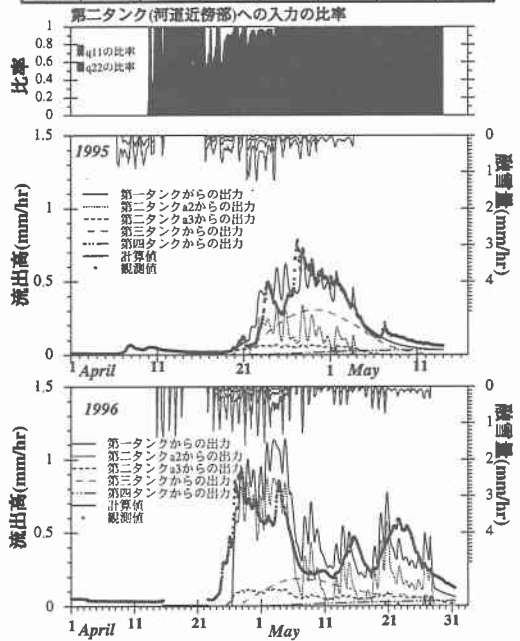


図-8 '95, '96年融雪期再現計算結果

に解析を行った。前節の再現計算結果は、融雪流出量を完全に再現しているわけではないが、ある程度満足できる結果を得た。

一方、この融雪量の空間分布を無視した場合についても検討しておく必要がある。図-9は'95年融雪流出について、各地帯で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、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、以下同様である。その結果、実測流量の4/24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、次の第2ピークは中流域の融雪量から成ることが理解できる。しかし、両方の流量ピークを再現するには、図-8で示したように各地帯の融雪量の空間分布を考慮しなければならない、と言えよう。

最後に、以上の再現計算結果から以下の結論が得られた。

- ① '93, '94年融雪期に見られる融雪初期の流出量の長周期のうねりは、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考えられる。
- 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 本試験地の様な小流域では、降雨流出における降雨の空間分布はほとんど考慮する必要がないが、融雪流出において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》

本研究の一部は、文部省平成8年度科学研究費補助金・基盤研究(c)(2) (代表者、中尾隆志)の補助と(財)北海道河川防災センターの平成8年度研究助成(早川 博)を受けて遂行された。記して謝意を表したい。

【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)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。
- 4)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。
- 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)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。

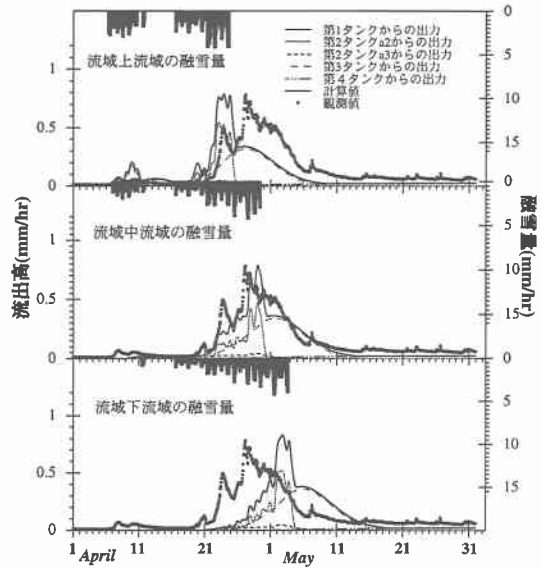


図-9 '95年融雪期における地点ごとの融雪量の影響