

II-21

富里ダム流出試験地における融雪流出特性

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

1. はじめに

融雪流出を取り扱う意義は、雪を水資源として確保する意味と融雪期における異常出水等から生じる河川災害の防止等の両面に渡り、多くの研究がなされてきた。しかし、本邦において融雪流出における凍結土層を考慮した例は少なく、凍結土層が流出にもたらす影響についてはあまり知られていない。

本研究の富里ダム流出試験地は北海道東部に位置する全国でも特異な少雪寒冷地域<sup>1)</sup>であり、他の積雪流域と異なり積雪及び凍結土層が流出に与える影響が大きい。よって本論文では、凍結土層が存在する融雪期の流出特性を検討し、夏・秋期とは異なる積雪・凍結土層を考慮した融雪流出モデルを構築することを目的とした。

2. 流出試験地の観測結果

流出試験地の概要・観測体制は既に報告している<sup>2, 3)</sup>。今回は、'95年度融雪期から開始した河道近傍の地温と既設の斜面部の地温観測結果をもとに、凍結土層が存在する場合の融雪水の移動経路について考察する。図-1は'94年11月から'95年5月にかけての積雪深と土壌の凍結深の経時変化を示している。凡例のNo.1が河道近傍でNo.6が尾根付近である。この年は積雪が少なく、2月に急に増えたため、No.1の河道部の凍結深が例年よりやや大きいものの、4月の融雪開始時期までには例年通り凍結がほとんどなくなっている。一方、斜面部は凍結層が例年と同じく5月まで残存しているので、この斜面部の凍結土層が融雪流出に影響を与えるものと考えられる。

図-2は上から河道から左岸斜面方向に10m離れた斜面部(図-1のNo.3)の地温(-10,-20,-30,-40,-50,-60cm), 次がその斜面部の麓の河道部(図-1のNo.1)の地温(-10,-30,-50,-70cm)と水温, その下が三角堰付近の水温, 地温(-10cm)と気温, 最後が三角堰の流量を示している。尚, 河道部では5月20日以降のデータが欠測である。

まず、流量と水温の対応を見ると、河道部、三角堰の水温は流量が増加し始める4月20日頃から上昇傾向にある。これは例年と同じである<sup>2, 3)</sup>。この水温の上昇を前報<sup>3)</sup>では、斜面部の凍結土層上面を流下してきた融雪水が一旦河道近傍で地中深く浸透し、地温で暖められた後に河道に流出してくる経路を推定した。今回開始した河道部の地温の計測結果を見ると、深さ50~70cmの地温は融雪開始前の水温にほぼ等

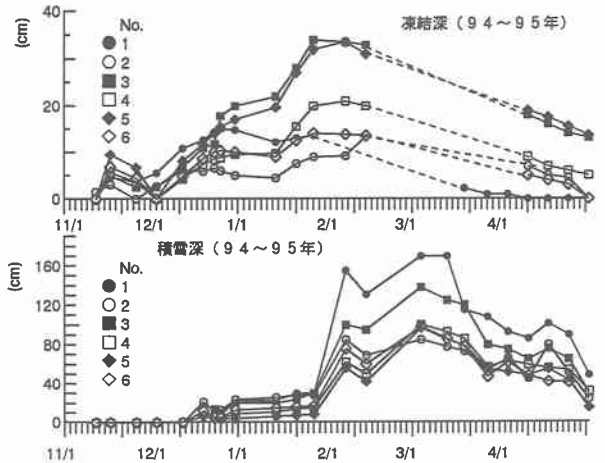


図-1 凍結深・積雪深の変化('94年~'95年)

Snowmelt Runoff Characteristics in the Tomisato Dam Experimental Basin  
by Hiroshi HAYAKAWA, Yasushi SAITO, Tetsuya ISHIDA and Kunihide UCHIJIMA

しく、融雪開始直後に若干低下して、融雪の進行と共に上昇している。この結果から、融雪前の河表水が深さ50cm以下の層からの流出であることがわかる。融雪開始後上昇した水温は、いずれの期間も地温を上回っている。河道近傍で浸透した融雪水が河道に流出してくる成分が支配的とは考えに難い。したがって、この水温の上昇の原因として、次の2通りの融雪水の経路が想定できる。一つ目は融雪水が地温を観測している地点より更に深い層まで浸透して流出してくる場合である。小林ら<sup>4)</sup>の観測結果によると、融雪期の水温が2m付近の地温に相当することを示している。もう一方は、融雪水が日射・気温等の外界との熱交換によって昇温されてから河道に流入する考えである。河道部を覆っている積雪が消えるのは、地温が急激に上昇し、水温も日変化し始める時期と考え、三角堰付近で融雪末期の5月10日頃、それより上流に位置する地温観測点の河道部と斜面部が5月1日頃で、下流部より雪融けが早い。本試験地は左斜面が北東向き、右斜面が西向きで、かつ周辺の地形条件から流域の上流域の方が日当たりは良い。つまり、本試験地は上流域の方が雪融けが早く、積雪の少ない尾根付近から河道に向かって融雪が進んでいるようである。これは図-1の積雪深の変化からも推定できる。従って、河表水の水温上昇は、融雪の早い上流域で地表面が露出し（樹木の周辺が特に早い）、そこで暖められた融雪水が河道に流入して水温を上昇させる移動経路が考えられる。

融雪初期にはその暖められて流入してくる融雪水（ある程度の日変化はある）が少ないので、三角堰での水温上昇は緩やかで、日変化もほとんどない。ところが、融雪が進むにつれて露出する地表面が増え、図-2の河道部の水温変化のように河道が開くと、急激に日変化し始めている。水温の上昇が気温の上昇にほぼ対応していることも、この推測を裏付けている。以上のように、後者の方が本試験地では支配的でありそうであるが、この仮説を実証するためには、流域の融雪の進行状況を空間的に把握する必要があり、今後の調査の課題である。

次に、融雪期間の地温の変化についてをみると、河道部は融雪の開始後、地温が一旦低下し、その後は徐々に上昇している。これは、斜面部の凍結層上を流れてきた融雪水が、河道付近で地中に浸透して地温を一旦低下させるが、融雪の進行につれて河道部に流下してくる融雪水が斜面部の露出した地表面で暖められるため、徐々に地温が上昇すると考えられる。これは、斜面部が露出して地表面の地温が上昇し始めた時期に、河道部の深い層の地温が上昇し始めていることから推測できる。また、斜面部も河道部と同様に融雪の開始と共に地温が一旦低下し、地表面が露出した5月1日頃から急激に地温が上昇している。斜面部は5月1

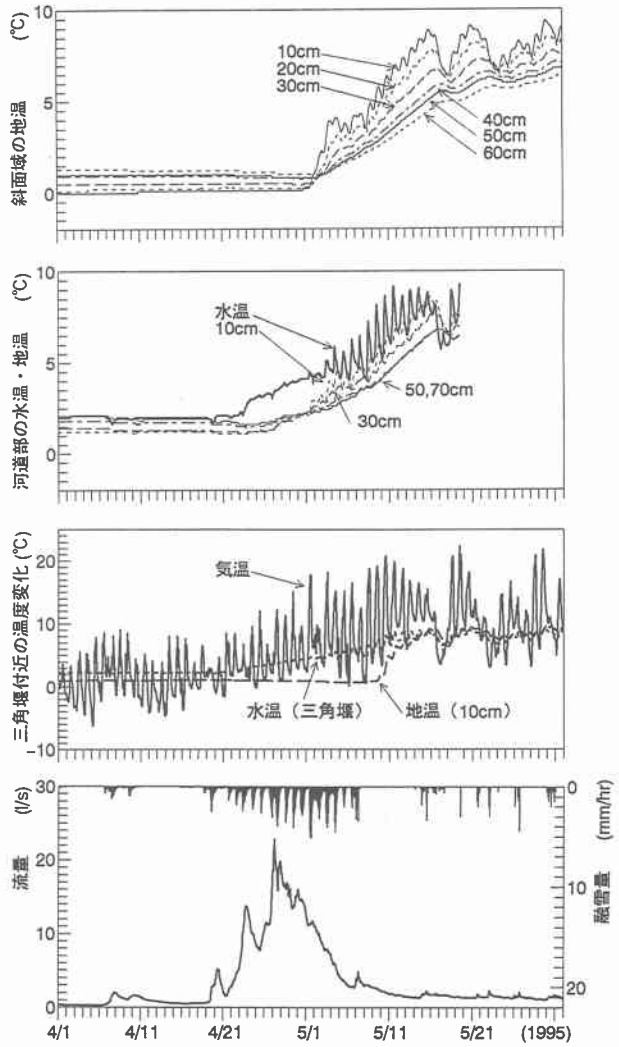


図-2 '95年融雪期における

融雪量・ハイドログラフと温度変化

日頃までまだ地表面が凍結しているので、50cm以下の地温が低下するという事は、融雪水が地表面の凍結土層を浸透していることを示している。表層を構成している土壌は腐植土が主であるので、凍結した土壌が、いわゆる間隙のないコンクリート状の凍結層でなく、幾らかの間隙を有した凍結土層になっている。したがって、本試験地の融雪流出において、融雪水が凍結土層に全く浸透しないのではなく、幾らかは浸透でき、融雪の進行とともに浸透能が増加していると考えられるべきである。

### 3. 富里ダム試験地の融雪流出特性

図-3は、本試験地の'93～'95年の3年間の融雪期のハイドログラフと融雪量を示している。融雪量は、'95年が三角堰横に設置したスノーライシメータの実測値で、'93年と'94年は'95年の実測値と気温の回帰式から求めた融雪量の推定値である。この気温だけの予測式は、かなり精度良く推定できることが確かめられている<sup>2)</sup>。ところで、スノーライシメータは流域の最下流部の三角堰横にあるため、流域の平均的な融雪量とはやや異なるようである。スノーライシメータの融雪量は、流量のピーク後に融雪量のピークが来ると言う不都合が生じていた。前節で指摘したように本流域の雪融けは上流部の尾根付近から始まり、融雪の進行につれて尾根から河道部へ、上流から下流部へ融雪が進むようである。したがって、ここでは、流量のピークの約12時間前に融雪量のピークが来るよう

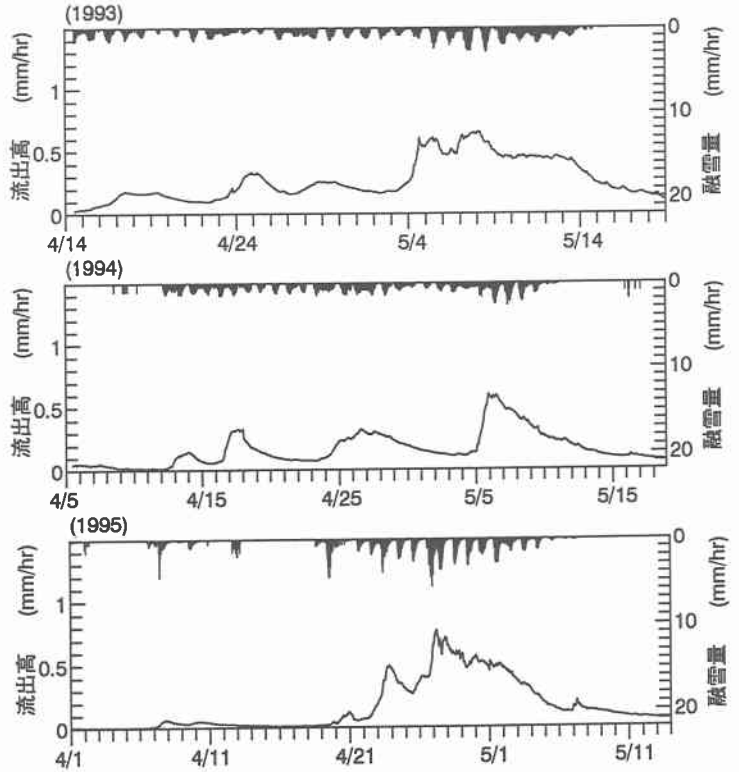


図-3 三ヶ年の融雪量・ハイドログラフの比較

にし、かつ、消雪時に融雪量がなくなるように補正を加えて融雪量を再計算した。図-3は全て、補正を加えた融雪量である。

'93年は5月4日、'94年は5月5日付近が融雪流量のピークであり、それより以前の融雪初期の段階で、いくつかの波長の長いうねりが認められる。融雪量は明確な日変化をしているが、流量にはその影響がほとんど現れず、融雪最盛期に若干日変化が見られるのみである。以上が本試験地の典型的な融雪流出形態である。ところが、'95年は、日平均気温が例年より高く、随分早く融雪が進んだ年で、それ以前とは少し異なった流量ハイドログラフであるが、融雪初期のうねりは小さいものの生起している。このうねりが凍結土層の影響であると仮定すると、例年より暖かかった'95年のうねりが小さくなったことと符合する。さらに図-2から、うねりの部分とピーク部分の水・地温の変化をみると、うねりの部分は地温が若干低下し始める頃で、融雪ピーク部分は低下した地温が元の地温に戻り、上昇する途中である。つまり、融雪初期のうねりの部分は、凍結土層上を融雪水が幾らかは下方に浸透しつつ、側方浸透流として流下しているが、ピーク時になると大部分が浸透して流出していると考えている。前節で述べたように、融雪水の流出経路はかなり

複雑で、地中に浸透した後の融雪水の挙動も考えなければならない。'95年は融雪期に一週間間隔で水質調査を行った。結果を図示していないが、融雪初期の流出はEC(電気伝導度)が低下し、フミン質の吸光度E<sub>260</sub>は増加した。これは、地中深くからの流出よりも表層からの流出が卓越していることを示している。

#### 4. 富里ダム流出試験地の融雪流出モデルの構築

夏期の洪水流出の特徴として、前報では地表面より50cm以下から流出される比較的遅い中間流出によって生起する第2ピークが、本流域試験地の流出特性であることを述べた。この特徴を再現するための流出モデルとして、融雪期にも対応できるように斜面域と河道部とを分けた多成分型の、土壌保水機能をもった並列三段タンクモデルを提案した<sup>3)</sup>。一般に、融雪流出解析では、夏期の洪水流出モデルをそのまま適用できると言われているので、この洪水モデルのパラメータをそのまま用いた再現計算を行った。融雪量は降雨と異なり地表との間に積雪層があるので、積雪層内での浸透・再凍結等による遅れを考慮しなければならない<sup>5)</sup>。今回は、この積雪層内の遅れを1段タンクの上段に別なタンクを設けることで表現した。予備計算で融雪量の前後12時間の移動平均をとった融雪量が、ハイドログラフとかなり良い相関があったので、このタンクの浸透孔の大きさはこの移動平均に一致させるように決めた。図-4が再現計算結果である。一見、水収支が合っていないようであるが、夏雨の土壌保水のパラメータが大きいいため、融雪流出のような長期に渡り弱い雨量強度が続く場合は、保水されたままで、流出してこないのである。また、流出の成分をみると、3年分を解析結果は、ほぼ第2タンクからのみの出力であり、第3タンクの基底流出部分による減水部分があうまく再現されていない。したがって、前節の観測結果と考察を基に、本研究では以下の4点を考慮した流出モデルの再構築を試みる。

- ①融雪期において、凍結融解後の土壌保水能力は異なっていると仮定する。
- ②斜面域の凍結土層の影響は並列タンクモデルの第1列目、第1タンクの浸透孔を絞り込むことによって表現する。
- ③融雪の初期から最盛期にかけ、凍結土層の浸透能

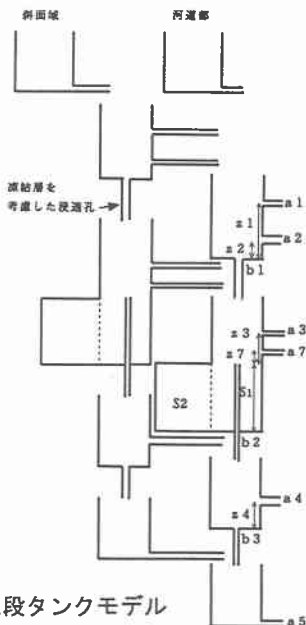


図-5 並列四段タンクモデル

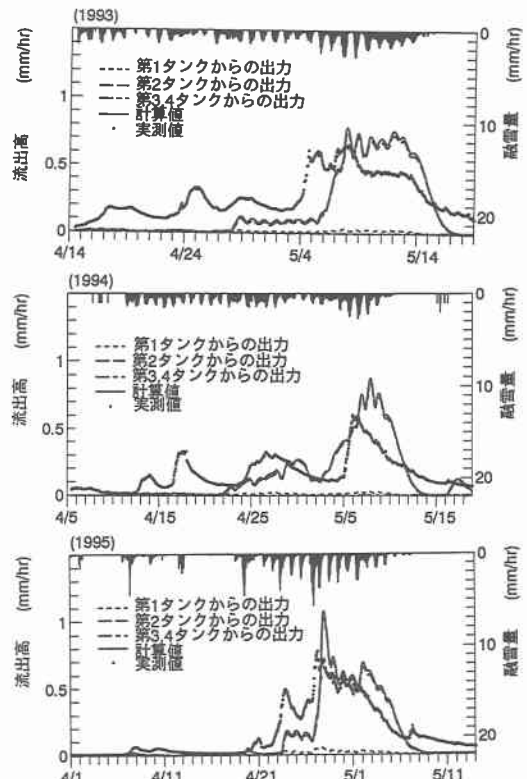


図-4 '94年9月の洪水時のパラメータを用いた融雪流出再現計算

は増加すると仮定する。つまり、第1タンクの浸透孔の大きさを、融雪の進行と共に変化させる。

④夏期の洪水流出の場合には、基底流量はほとんど無視できるが、融雪流出は、長期流出と考えられるので、基底流量用の第4タンクを設ける。

#### 4.1 土壤保水機能の影響

図-4の結果から、土壤保水機能は夏期のままであると働き過ぎるようである。そこで図-5の第2タンクの保水タンクの大きさ( $S_2$ )と浸透孔の高さ( $S_1$ )を半分にして能力を低下させ、その他のパラメータは同じにした。その結果が図-6である。特に'93年、'94年の融雪初期に見られるうねりの部分の流出が完全ではないが再現している。したがって、融雪期に保水機能が低下するとの仮定はほぼ妥当である。しかし、これでもまだ第2タンクの出力が卓越しているのので、次に、融雪水が斜面部の凍結土層上を流下して河道に流入すると仮定して、凍結土層の影響を考慮する。

#### 4.2 凍結土層の影響

融雪水が凍結土層上を流下して河道に流入する機構を図-5のタンクモデルで再現するために、並列タンクの第1列第1タンクの浸透孔の開孔度を凍結に応じて変化させる。前述したように表層の凍結土層は全く浸透できないのわけではなく、融雪の進行状況、凍結土層の融解の程度に応じて浸透能が変化すると考えられる。まず、凍結土層の影響を明確にする意味から一旦土壤保水機能を外し、第1タンクの浸透孔の開孔度を変化させ、流出への影響を調べる。図-7は融雪開始時の開孔度を0%（浸透がない場合）、30%、50%の3通りからスタートし、融雪終了時期で全開（洪水流出の浸透孔に一致）にした場合である。この間の開孔度は、凍結土層の融解に関係するとして、気温の積算暖度の経時変化に比例させた。'93年の計算結果で

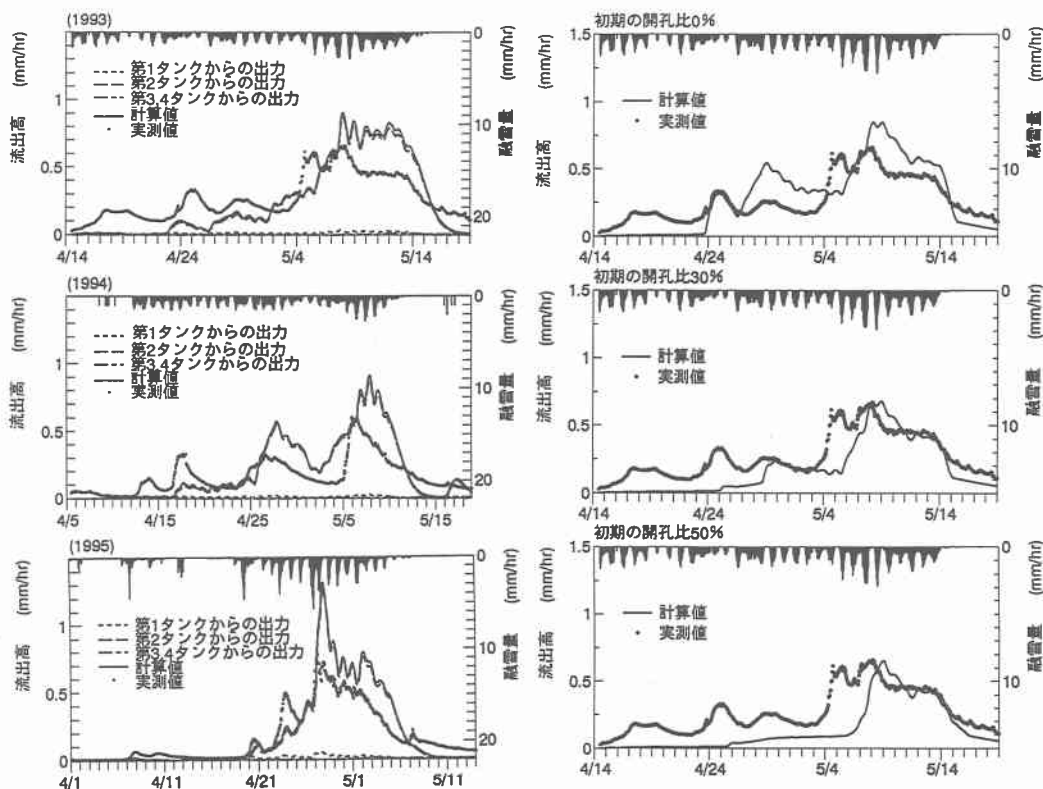


図-6 土壤保水機能を変化させた再現計算

図-7 初期の開孔比の変化の影響

あるが、4月24日の開孔度が0%の場合、初期の流量のうねりがうまく再現できている。ところが開孔度を次第に大きくして浸透の割合を増やしていくと、うねり部分が遅れて生じ、うねりも小さくなる。50%開いた状態からスタートすると、ハイドログラフは全開の場合とほとんど大差ない。

また初期の開孔度を10%に固定し、開孔度を全開にする時期を変化させて比較した。その結果、全開にする時期を流量のピーク以前にした場合は、いずれも流量のうねり部分を再現できなく、融雪末期に開孔度を80%にした場合が、流量との対応が良くなった。したがって、凍結土層の影響は第1タンクの浸透孔の開孔度を変化させることで、評価できることがわかった。

#### 4.3 凍結土層と保水機能を考慮した再現結果

以上の検討結果を考慮して、最終的には図-5の土壤保水機能をもつ並列四段タンクモデルを再構築した。パラメータは、土壤保水機能が洪水モデルの半分の保水能力にし、第1タンクの浸透孔を融雪初期に洪水モデルの10%、融雪末期に80%とした。また、基底流量を一致させるために、予め各タンクに初期貯留高を与えて、計算開始時点の基底流量に一致させてから流出計算を行った。

図-8がこのパラメータを用いた'93年から'95年までの再現計算結果である。'93年と'94年では融雪初期において第1タンクからの出力が主になって、斜面域の凍結土層の影響をうまく表現している。また融雪最盛期における流量のピーク部分が、凍結層の浸透能が増加することによって卓越する第2タンク以下の流出成分から構成されることを再現している。

#### 5. おわりに

本研究は富里ダム流出試験地の3年間に渡る観測結果を基に、融雪出水のメカニズムを調べ、その流出機構を反映した融雪流出モデルを構築した。その結果、本試験地の特徴として、①流域の斜面域は融雪末期まで土壤が凍結しているが、河道近傍はほとんど凍結していない、②融雪初期から最盛期にかけてハイドログラフに10日サイクル程度のうねりが認められる③河表水の水温と地温の関係から、融雪水の大部分は斜面の凍結土層上を流下するが、一部は凍結層を浸透して流出する、④流域の立地条件から、融雪が上流域から始まる等、他の流域と比べかなり特異な現象が見られた。しかし、流出モデルもまだ改良すべき点もあり、今後、より精度の高いデータを収集して、(降雨・融雪)流出モデルを改良していきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 内島・早川：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) 早川・内島：富里ダム流出試験地について，土木学会北海道支部論文報告集，第50号 pp.324 - 329,1994.
- 3) 早川・内島：富里ダム流出試験地における流出特性について（第2報），土木学会北海道支部論文報告集，第51号 pp.60 - 63,1995.
- 4) 小林・石井・野村：融雪及び降雨流出時における川水温の対比と流出成分の分離，水文・水資源学会誌 Vol.7, No.6, 1994.
- 5) 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.

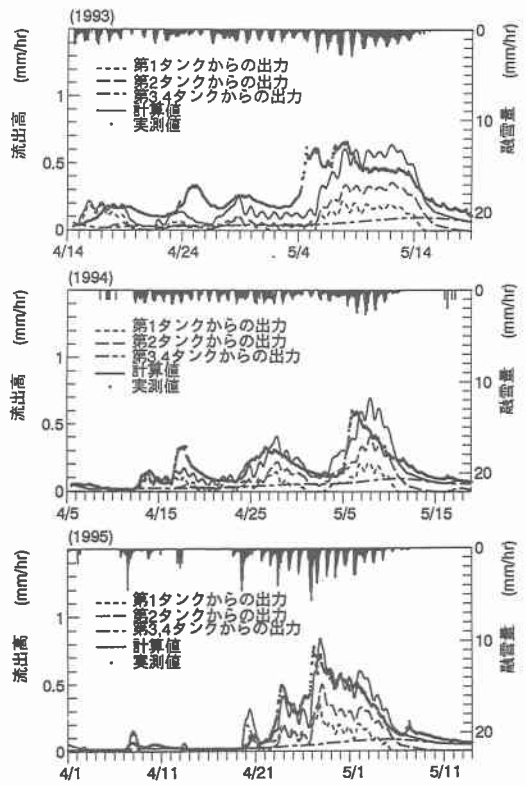


図-8 凍結・土壌の影響を考慮したモデルでの再現計算