

II-9

富里ダム流出試験地の流出特性について (第3報)

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、1992年11月に北見市郊外の富里ダムに流出試験地を設け、これまで本試験地の持つ降雨流出の特徴や冬期間に凍結した土壌が融雪期にも残存する特異な状況下における融雪流出特性について報告してきた<sup>1,5)</sup>。本試験地の位置する北海道東部地域は年間降水量が800mm以下の全国的にみても小雨地域に当たり、融雪出水規模の降雨出水を観測するのも希な地域である。今年度は平成10年9月16~18日の台風5号が北海道東部地域を直撃し、本試験地においても開設以来最大規模の降雨出水を観測した。今回はこの降雨出水の観測結果を含め、本試験地の降雨流出特性について報告する。

2. 降雨流出特性

本試験地は流域面積が8.4haの0次谷の小流域である。流出試験地の概要、及び流域の地形特性や水文観測体制の詳細については、参考文献<sup>1,2)</sup>を参照していただきたい。表-1は1993年からの主だった洪水流出の水文諸量である。降雨量の比較の少ない道東地域において、洪水No.6-2の総降雨量97mm、No.6-3の76mm、No.14の102.5mmは最大値の部類である。本試験地の流出率は大部分が0.1以下で、これ以上となったのはNo.1の0.288、No.6-3の0.34、No.14の0.696である。図-1には代表的な洪水流出のハイドログラフと土壌水分変化(サクシオン)を示している。No.14は今回の台風5号による出水で、No.6とともに総降雨量が多く、流出高の大きい流出である。両出水とも土壌の湿潤状態を示すサクシオンが回復する前に次の降雨があり、地表面下80cmの地点まで水分が浸透して土壌の湿潤度が高くなり、流域の保水能が低下するために大きな出水となっている。No.8は総降雨量は少ないが降雨強度の大きい場合の流出であり、No.9は降雨強度の弱い雨が比較的長時間続いた場合の流出である。両者とも降雨後のサクシオンは地表面下50cm以下の地点ではほとんど変化していなく、この程度の降雨では土壌中の湿潤度を高めるだけに寄与し、大きな出水に至らないことがわかる。

表-1 流出の水文諸量

洪水番号	洪水流出日	総降雨量 (mm)	直接流出高 (mm)	流出率	初期流出高 (mm/hr)
no.1	k930611h	60.0	17.285	0.288	0.043
no.2-1	k930816h(8/17)	11.0	0.295	0.027	0.050
no.2-2	k930816h(8/18)	12.0	0.228	0.019	0.060
no.3	k931022h	64.0	3.497	0.055	0.026
no.4-1	k940811h(8/11)	20.0	0.215	0.011	0.003
no.4-2	k940811h(8/12)	20.0	0.312	0.016	0.008
no.4-3	k940811h(8/14)	31.0	0.893	0.029	0.007
no.5	k940831h	24.5	0.633	0.026	0.002
no.6-1	k940914h(9/16)	35.5	1.548	0.044	0.005
no.6-2	k940914h(9/20)	97.0	15.444	0.159	0.008
no.6-3	k940914h(9/24)	76.0	25.819	0.340	0.025
no.7	k950711h	41.5	0.459	0.011	0.025
no.8	k960602qh	16.5	1.332	0.081	0.076
no.9-1	k960710h(7/11)	36.0	0.552	0.015	0.050
no.9-2	k960710h(7/18)	13.5	0.266	0.020	0.074
no.10-1	k960922h(9/23)	32.5	1.062	0.033	0.038
no.10-2	k960922h(9/25)	15.5	0.375	0.024	0.062
no.11-1	k970515h(5/15)	10.0	0.169	0.017	0.062
no.11-2	k970515h(5/16)	15.0	0.313	0.021	0.071
no.11-3	k970515h(5/17)	18.0	0.242	0.013	0.112
no.12	k970808h	61.5	2.241	0.036	0.011
no.13-1	k970919h(9/19)	30.5	0.598	0.020	0.018
no.13-2	k970919h(9/20)	18.5	0.512	0.028	0.033
no.14	k980904h	102.5	71.362	0.696	0.140

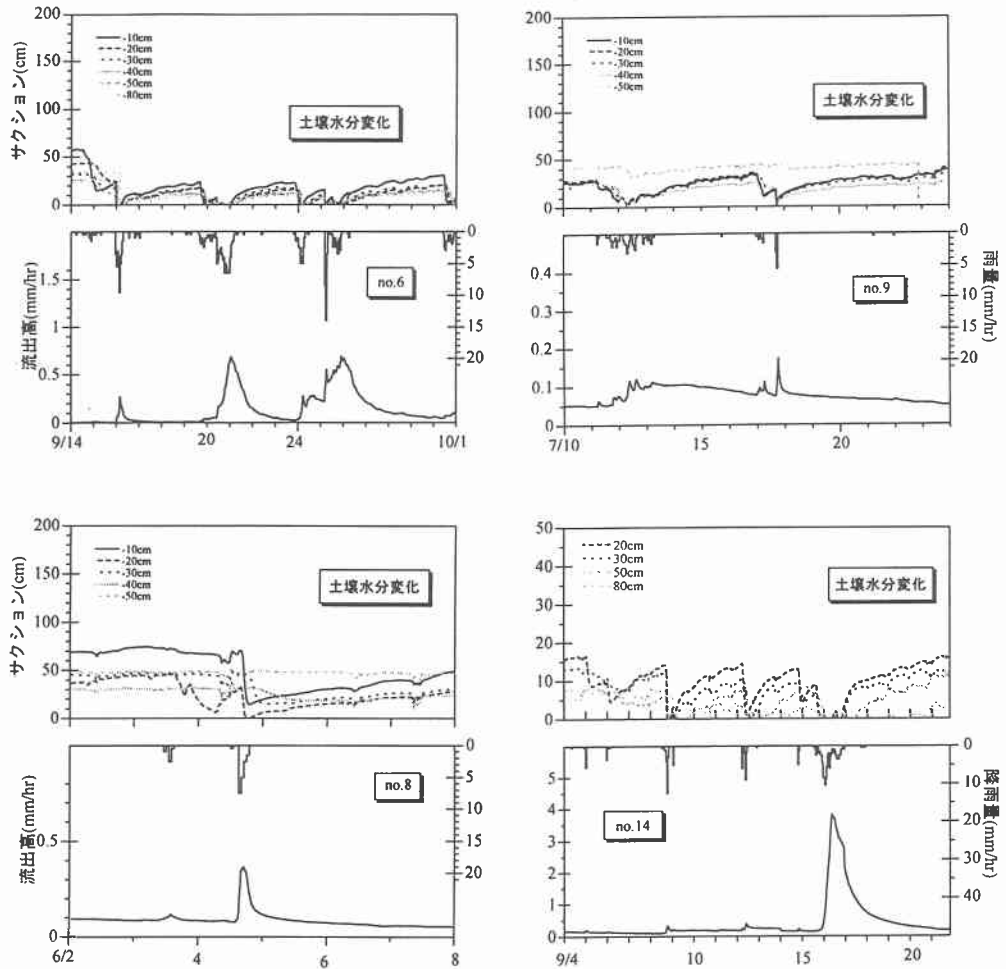


図-1 ハイドログラフと土壌水分変化

ってくるが、その流域の保水能を知る良い指標となる。図-2 (a)はこの関係について先行降雨の有無による影響を考慮して整理したものである。ここで、先行降雨とは対象とする出水の一週間程度前までの降雨のことであり、一応の目安として 10mm 程度のまとまった降雨を先行降雨とした。図-2 より先行降雨のある出水の方が当然の事ながら損失雨量とならずに直接流出成分となる比率が大きくなっている。これは先行降雨により流域の保水能が低下し、流出しやすくなったためと推察される。また、本試験流域では総降雨量が40mm程度であれば、先行降雨の有無に関わらず大部分が損失雨量として流域に浸透し、先行降雨が無い場合は60mm程度までが損失雨量となる。図-2 (b)はこの関係に対する降雨強度の影響を示したものである。この図から降雨強度がある程度強い場合でも、総降雨量が 40mm 程度までであれば大部分は損失雨量となることがわかる。

図-3 は初期流出高と流出率の関係を (a) 先行降雨, (b) 総降雨量, (c) 雨量強度の各視点で捉えた結果を示

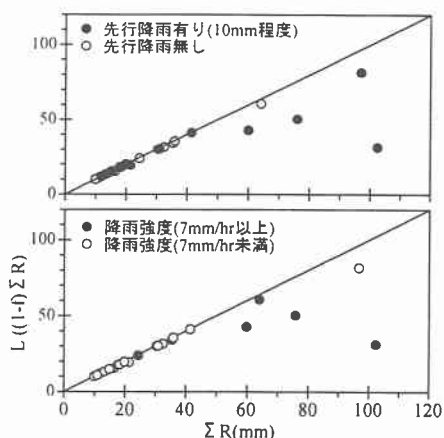


図-2 総降雨量と損失雨量の関係

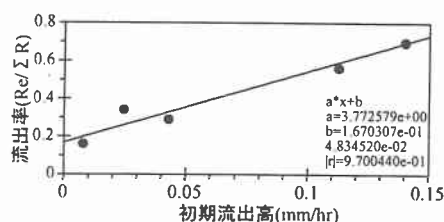


図-4 初期流出高と流出率の関係(相関図)

している。ここで初期流出高とは、一般に初期流量(1/s)と呼ぶハイドログラフの立ち上がり部の流量を流出高(mm/hr)で表したものである。これらを総括すると、先行降雨の無い場合は初期流出高の大きさに関係なく流出しにくく、先行降雨がある場合と総降雨量が多い場合(60mm以上)、さらに雨量強度が大きい場合(8mm/hr)には直接流出成分として流出しやすい傾向にある。図-4は流出率が0.1以下のものについては除外して流出率と初期流出高の相関をとったものである。これらの4点の総降雨量は図中左より97mm, 76mm, 60mm, 102.5mmと他に比べて降雨量が多い。このように、本試験地ではこれだけの降雨があった場合に流出率は初期流出高と相関が高く、逆を言えば、これだけの降雨がなければ降雨量の大部分が損失雨量となり、本試験地の流出形態は表面流などの直接流出成分より浸透流による中間・地下水流出成分が支配的であることが推察される。

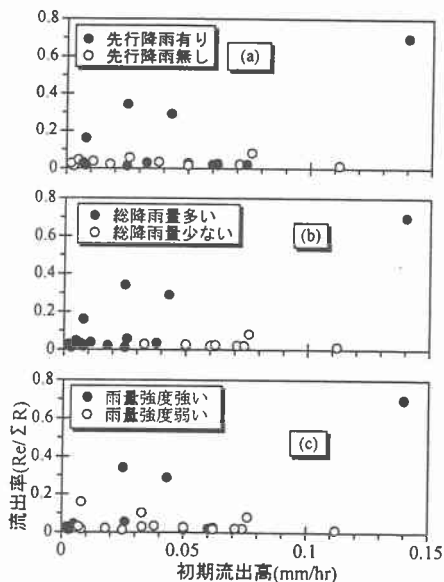
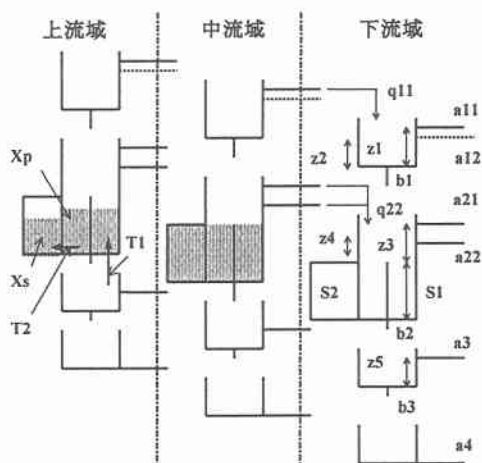


図-3 初期流出高と流出率の関係(先行降雨, 総降雨量, 雨量強度)



地帯面積比(上:中:下流域) 9:3:1

図-5 三列四段タンクモデルの構造

### 3. 三列四段タンクモデルによる流出解析

#### 3.1 三列四段タンクモデルの土壌水分構造の同定

著者らは、これまでに土壌水分構造を組み込んだ三列四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<sup>45)</sup>。図-5はタンクモデルの構造を示す。これまでの解析では、この土壌水分構造と実際の土壌水分状態との関係が明らかになっていない。土壌水分の実測値と土壌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、土壌水分構造へのパラメータの初期値として有効なものとなる。

本研究では、土壌水分の実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、まず三列四段タンクモデルの土壌水分構造の同定を行った。以下はその手順である。

- 1) 個々の出水について保水タンク内の初期貯留高  $X_s$  を固定して、 $S_1$ ,  $S_2$  を最適同定する。これは、土壌の保水状態がタンク内の土壌水分構造に関連すると考えたためで、それに対応する  $S_1$ ,  $S_2$  の大きさを知っておく必要がある。なお、 $S_1$  は一次土壌水分の飽和容量を、 $S_2$  は保水タンク内における二次土壌水分の飽和容量を示す。
- 2) 個々の出水について同定された  $S_1$ ,  $S_2$  の最大値が土壌水分構造の飽和容量の大きさを規定する値と考へて、 $S_1$ ,  $S_2$  は洪水によって変化しないものとする。保水タンク内の初期貯留高  $X_s$  は 1) で同定した  $X_s/S_2$  の比率が変わらないとして、この  $S_1$ ,  $S_2$  から再計算し、土壌水分構造の  $X_s/S_2$  を決定する。
- 3) 他のモデルパラメータの値は各洪水毎に大きく変動しないように留意して同定する。

表-2 三列四段タンクモデルパラメータ

	no.1	no.2	no.3	no.4	no.5	no.6	no.7	no.8	no.9	no.10	no.11	no.12	no.13	no.14
	fr930611	fr930816	fr931022	fr940811	fr940831	fr940914	fr950711	fr960602	fr960710	fr960922	fr970515	fr970808	fr970919	fr980904
a11	0.1	0.08	0.08	0.06	0.06	0.1	0.05	0.1	0.08	0.04	0.06	0.08	0.05	0.08
a12	0.1	0.06	0.06	0.04	0.04	0.1	0.05	0.1	0.06	0.04	0.06	0.08	0.06	0.08
b1	0.8	0.3	0.35	0.27	0.27	0.5	0.27	0.24	0.26	0.2	0.25	0.27	0.32	0.06
a21	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.25
a22	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.25
b2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.04
a3	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.07	0.07	0.03	0.03	0.037	0.02	0.04	0.12
b3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.01
a4	0.014	0.016	0.013	0.006	0.005	0.005	0.009	0.021	0.013	0.016	0.015	0.003	0.006	0.017
h12	180	150	130	110	170	75	150	170	185	170	190	190	160	195
h22	180	140	120	100	160	70	145	160	180	165	180	190	150	195
h32	180	140	120	100	160	70	145	160	180	160	185	185	150	195
h34	30	40	30	10	10	10	40	60	50	30	50	20	30	100
xs0	90	70	55	50	80	40	70	80	110	90	100	115	70	175
xs1	90	70	55	50	80	40	70	80	110	90	100	115	70	175
xs2	90	70	55	50	80	40	70	80	110	90	100	115	70	175
s1	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
s2	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
k1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
k2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

#### 3.2 三列四段タンクモデルの解析結果

本モデルによる解析結果を図-6, 7に、同定したパラメータを表-2に示す。図-6は総降雨量が多い、規模の大きな洪水流出の例である。No.6の出水について説明すると、No.6-1の出水は降雨強度が強かったため、流出の大部分が表面流として流出している。No.6-2の出水は総降雨量が多かったために、表面流以外にも流出の遅れ時間が次第に大きくなる中間流出や基底流出が現れている。No.6-3の出水は遅い中間流出と基底流出が支配的であるが、降雨強度の強い降雨のため、表面流出と早い中間流出の比率が大きくなっている。No.6-2, 6-3の出水は、それぞれNo.6-1, 6-2の降雨が先行降雨となっているため、土壌のサクシオンは回復せず高い湿潤状態を保持したままである。そのため、ハイドログラフの立ち上がり部分で表面流出成分が多く流出していることが、解析結果から判断できる。また、No.14の出水はこれまでで最大規模の流

出である。No. 6 の出水と比較して表面流と早い中間流の各成分が支配的である。これはハイドログラフの立ち上がり部の初期流出高の違いから推察できる。No. 6 と No. 14 の初期流出高を比較すると、No. 14 の方が多いことがわかる。このことから、No. 14 の出水は先行降雨の影響を No. 6 の場合より強く受けたため、サクシオンが回復せずに土壤の湿潤状態が高かったこと、降雨強度が強かったために表面、中間の各流出が支配的となったと考えられる。一方、図-7 は比較的降雨量が少ない、規模の小さな流出の解析結果である。No. 8 の出水は先行降雨が無く土壤は乾燥状態にあるが、降雨強度が強いため大部分が表面流としての流出である。No. 9 の出水は降雨強度は弱いものの、降雨継続時間が比較的長く総降雨量が多いので、中間、基底流出の割合が高くなると考えられたが、図-1 より地表面下 50cm より下の土壤が乾燥状態にあるため、それほど大きな流出となっていない。

### 3.3 保水タンクパラメータとサクシオンの関係

図-8 はサクシオン $\psi$ 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、実際の土壤における体積含水率 $\theta$ に相当すると考えられる。 $\theta$ と $\psi$ の関係で比較的よく用いられる式として、Brooks-Corey の式が挙げられる<sup>9)</sup>。この式は体積含水率 $\theta$ がサクシオン $\psi$ のべき乗で表される式である。このべき乗関係を、 $X_s/S_2$  とサクシオンの関係にもあてはめたところ、 $X_s/S_2$  は地表面下 80cm のサクシオ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壤水分構造の重要なパラメータは、その初期値を土壤水分の実測値から与えられる。

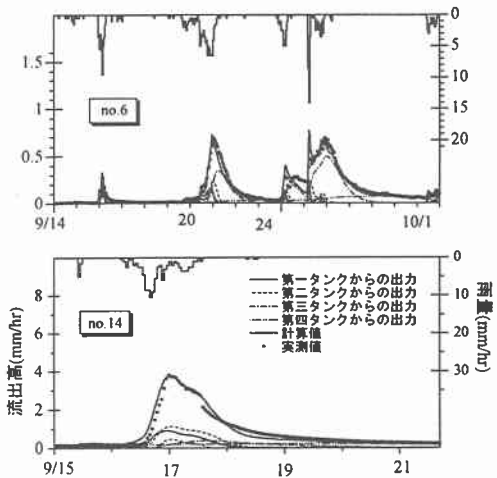


図-6 三列四段タンクモデルの計算結果(no.6,no.14)

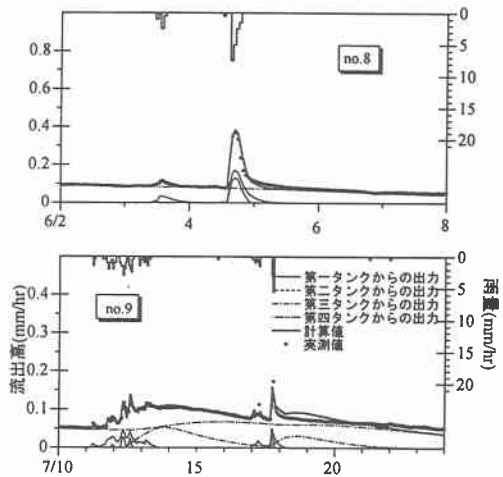


図-7 三列四段タンクモデルの計算結果(no.8,no.9)

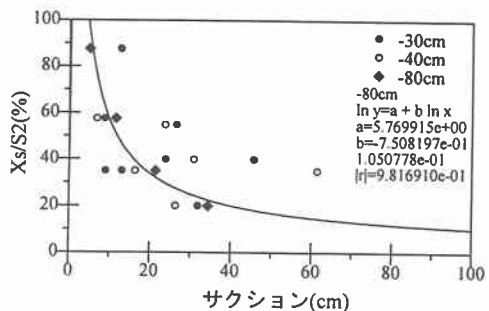


図-8 サクシオンと  $X_s/S_2$  の関係

### 3.4 直列四段タンクモデルによる再現結果

三列四段タンクは、本試験地の流域規模から考えると、かなり複雑なモデルと考えられるが、融雪流出解析で土壤凍結の場合には、融雪量の空間的な分布を考える上で必要であった。そこで、降雨流出用に簡略な直列四段タンクモデルを本試験地に適用した結果を次に示す。図-9は直列四段タンクモデルによる再現結果である。緩やかな減水曲線を持つ流出については再現性が良いが、表面流出成分の卓越する明確な変曲点を持つような減水曲線は巧く再現することができない。また、出水毎に同定したモデルパラメータも変動幅が大きく、流域に普遍的な値を持たせることは難しい。これに対し、三列四段タンクモデルでは各出水時に同定したパラメータの変動幅が小さいので、土壤水分の状態に応じ保水タンクの初期貯留高を与えるだけで、後はパラメータの微調節で本試験地の殆どの流出形態に対応する事ができる。

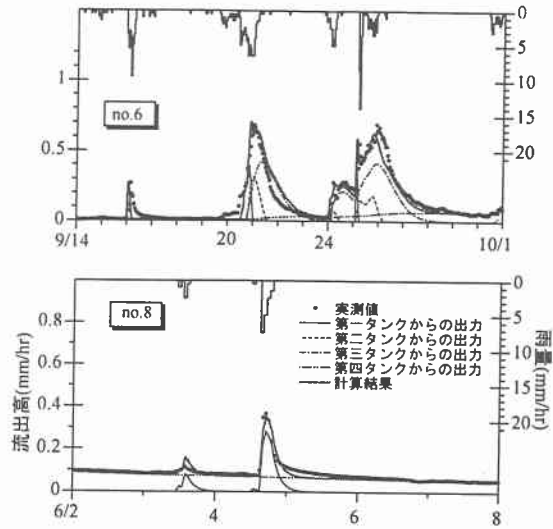


図-9 直列四段タンクモデルの計算結果(no.6,no.8)

### 4. おわりに

今年度は流出試験地の開設以来、最大規模の降雨出水があり貴重なデータを得ることが出来た。本研究により得られた成果は以下の通りである。

- 1) 本流出試験地では総降雨量が 40mm 程度であれば、先行降雨の有無に関わらず殆どが損失雨量として土壤に浸透し、先行降雨がない場合は 60mm 程度までが損失雨量となる。このことから、本試験地は保水能が高く、流出形態は浸透流による流出が支配的である。
- 2) 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 のサクシオンと相関が見られ、実測値から初期値を推定できる。
- 3) 本試験地における三列四段タンクモデルパラメータの普遍的な値が得られた。土壤水分 (サクシオン) の実測値から得られた土壤水分構造のパラメータ ( $X_s/S_2$ ) を与えるだけで、殆どの流出を再現できる。

《謝辞》本研究の一部は平成 10 年度文部省科学研究費・基盤研究(C)(2) (代表:早川博) 並びに (財) 北海道河川防災センター平成 10 年度研究助成 (早川博) の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: 富里ダム流出試験地の融雪流出解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 53 号, pp.94-99, 1997.
- 5) 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.
- 6) 日野・太田・砂田・渡辺: 洪水の数値予報<その第一歩>, 森北出版, 1989.