# 美々川流域における長期流出解析

Long-term runoff analysis in the Bibi River basin

苫小牧工業高等専門学校専攻科	○学生員	大頭芽衣	(Mei Ogashira)	)
苫小牧工業高等専門学校	正会員	八田茂実	(Shigemi Hatta)	)

## 1. はじめに

苫小牧周辺の河川流域は活火山である樽前山を水源に 持ち,渇水比流量が大きく,流量変動が小さいという特 徴を持っており,年流出高が年降水量を大きく上回る河 川も少なくはない<sup>1)</sup>. 流域が水収支的に閉じていないの は,厚く堆積した火山噴出物が流域の旧地形を覆ってい るため,必ずしも地表流域界と地下水流域界が一致して いないことに一因がある.苫小牧東部に位置する美々川 流域(流域面積は 65.7 ㎢) もこのような特徴を有して いるが,斎藤ら(1998)が周辺の地下水位変動から,池田 ら(1999)が地下水水温の解析によって地下水流域面積を 約 106 km と推定している(図 1)<sup>2)3)</sup>.しかし,水収支 的にも合わず通常の降雨流出モデルを適用することは難 しいため,降雨流出のモデル化には至っていない.

一方,この地域の流域の渇水比流量が大きく,流量変 動が小さいという特性に注目すれば,地下の集水域から の流入はほぼ一定になると推定されるため,地下水流出 成分に一定の流入量を与えることによって,流出量を再 現できることが期待できる.

本研究では、美々川流域を対象として、地下水流域界 の大きさを考慮した上で、長期間の解析の可能な降雨-流出モデルを構築することを目的とする.また、ここで 得られたモデルを苫小牧地域の水収支的に流域の閉じて いない流域に適用し、その汎用性について検討する.



図1 美々川の流域図 (実線:地表流域,破線:地下水流域) (地下水流域は斎藤ら(1998)らの文献を参考に作成)

#### 2. 解析対象地点と水文資料の収集

降雨流出モデルでは,降雨と流量の資料が最低限必要 となる.降雨資料は,気象庁で公開されているアメダス 観測値の1時間観測値を利用する.美々川では最寄りの 千歳地点を利用し、小糸魚川、苫小牧川では苫小牧地点 のデータを利用する.一方、流量資料は、水位の観測資 料から水位流量曲線によって流量に換算して用いた.水 位資料は美々川流域を北海道から、苫小牧川流域を北海 道開発局から提供を受けた.小糸魚川流域については、 過去に本校で観測した資料を用いた.

美々川では本川の4カ所で水位観測が行われており, 北海道から提供を受けた水位と流量の観測資料より,そ れぞれの地点の水位流量曲線の作成を行ったところ,季 節的な変動の最も少ない美々川河口地点の観測資料を用 いることとした.

#### 3. 水収支の検討

降水については、寒冷地では冬期間の降水を降雪と降 雨に分けて取り扱う必要がある.降水形態の推定は、こ れまで天気予報の立場から調べられてきており、多くの 研究で個体降水の発生確率が 50%となる地上気温を雨 雪の判別気温としていて、2度~3度が予報の指針とし て考えられている.長谷美(1991)は、個体降水の発生確 率と地上気温の関係は地域性が大きいことを明らかにし、 太平洋側において雨と雪の境の地上気温を2度としてい る.伊藤(1944)の結果も、太平洋側の冬季降水が主とし ては低気圧によるものと考えれば、長谷美の結果と同じ ものといえると述べている<sup>4)</sup>.これらのことから、本研 究においても、2度以上の降水は降雨、それ未満は降雪 として取り扱うこととした.気温に関しては、同時に観 測されているものを用いる.

降雪については、積雪量を算定すると同時に、 Degree-hour 法により融雪量の計算も行う. Degree-hour 法は、融雪の諸因子を気温で代表させる方法で、堺 (1963)によって提案された<sup>5)</sup>. 時刻 t における Degreehour 法の計算式は次式のように表される.

$$M(t) = dhf \times T(t) \tag{1}$$

ここで, *M* は融雪量, *dhf* は融雪係数, *T* は気温を表し, 本研究では融雪係数に 0.2 を採用している.

なお,降雪量については過少に観測されることが多い ため,アメダスの観測値を 1.8 倍することとした.この 値は馬場ら(2001)がスノーサーベイで観測した積雪量と アメダスで観測された降水量とを比較して得られた値で ある<sup>の</sup>.

上記の方法で雨雪分離を行い,2011/12/1~2014/11/30 の3年間の水収支を調べた結果,総降水量は3231mm, 総流出量は4039.635mmで,蒸発散を除いても1年あた り約270mmの不足がある.

# 4. 流出モデルと算出結果

#### 4.1 従来型タンクモデルの適用

はじめに既往の流出モデル(直列3段タンクモデル) による流出量の算定を行う.タンクモデルは雨量から河 川の流量を算定するもので,図2のような形をしている. 非常に簡易なモデルイメージでありながら,比較的再現 性が高いモデルとして用いられている.概念的に,3段 タンクの上段は表面流出,中段は中間流出,最下段は地 下水流出にあたると考えられ,雨は一番上のタンクから 入力される.各タンクは側面と底面とにそれぞれ流出孔, 浸透孔を持ち,各タンク内の水は側面の孔から流出し, 底面の孔から一段下のタンクへ移行する.側面の孔から の流出の和により河川の流量を算出するシステムとなっ ている<sup>¬</sup>.時刻tにおけるi段目タンクの貯留量 *Si(t)*, 流出量 *ri(t)*,下段タンクへの浸透量 *pi(t)*はそれぞれ次式 のように表される.

$$S_i(t) = S_i(t-1) - r_i(t-1) - p_i(t-1) + p_{i-1}(t-1)$$
 (2)

$$r_i(t) = \max\left(\alpha_i \left(S_i(t) - h_i\right), 0\right)$$
(3)

$$p_i(t) = \max\left(\beta_i S_i(t), 0\right) \tag{4}$$

ここで、 $\alpha_i$ ,  $h_i$ ,  $\beta_i$ はモデルパラメータで、1 段目タン クに流入する  $p_0$ に観測雨量を与える.



図2 既往の流出モデル

なお、本研究におけるタンクモデルによる流出量の再 現性は Nash-Sutcliffe 係数を用いて判断する. Nash-Sutcliffe 係数は、流量の誤差の大きさを考慮してモデル の精度を評価する指標をいい、その値が1に近いほどモ デルの精度はよいとされ、一般的に 0.7 以上でモデルの 再現性が高いとされている. Nash-Sutcliffe 係数 *NSE* は、 次式で定義される<sup>8</sup>.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{N} (y_o(t) - y_c(t))^2}{\sum_{t=1}^{N} (y_o(t) - y_{av})^2}$$
(5)

ここで, *N* はサンプル数, *y<sub>o</sub>(t)*は時刻 *t* における観測 流量, *y<sub>c</sub>(t)*は時刻 *t* における算出流量, *y<sub>av</sub>* は観測流量の 平均値を表す.

既往の流出モデルで NSE が最大となるようパラメー タを調整した算出結果を図3に示す.算出期間は,水収 支を調べた期間と同期間となっている.算出結果は共通 して青い線が観測値,橙の線が算出値を示している.設 定したパラメータを表1に示す. NSE は 0.65 となり, 入力が不足することにより計算流量が徐々に低下してい ることが確認できる.



図3 流量の再現結果(美々川 既往の流出モデル)

表1 パラメータ (美々川 既往の流出モデル)

tank No.	a (1/hr)	h (mm)	b (1/hr)	s (mm)	$\Delta P$ (mm/hr)
1	0.0001	0.2	0.075	0	
2	0.002	0	0.0032	0	0
3	0.00008	0	0	2110	

#### 4.2 地下水流入を考慮したタンクモデルの構築

ここでは水収支で確認した不足分と美々川の流出特性 を考慮したモデルを作成し、そのモデルによる流出量の 算出を行う.

このタンクモデルは図4のような形をしており, (1)流域を地表システムと地下システムに分ける (2)最下段タンクには水収支で確認した不足分を ΔP と して入力する

という特徴を持っている. 図中の P は降水量, f は地表 流出率,  $\Delta P$  は降雨不足量の平均値, R は流出量を表す.



図4 構築したタンクモデル

(1)については、美々川は地表流域に対して地下水流域 が大きく、ほかの河川に比べて地下へ浸透し河川へ流れ 出てくる量が多くなる.そのため表面流域と重なってい ない地下水流域への降雨は直接地下のタンクに入れる構 造とし、地表流出率fは表面流域と地下水流域の比から 以下のように求めた.

#### f = 65.7 / 106.2 = 0.62

(2)については、この地域の流域の渇水比流量が大きく、 流量変動が小さいという特性に注目すれば、地下の集水 域からの流入はほぼ一定になると推定される.これを水 収支で確認した不足分とみなし、地下水流出成分に  $\Delta P$ として一定の流入量を与えることとした.高橋ら(2001) によると、美々川は地下水流域界で考えると長期的に水 収支は均衡しているが、年ごとの水収支は必ずしも均衡 していない <sup>9</sup>.このため、算出期間によって  $\Delta P$  の値が 変動し得ることになる.実際に、より長い期間での  $\Delta P$ を算出した結果、今回計算する 3 年間での  $\Delta P$  よりも値 が小さくなることを確認している.このことから本研究 では、より再現性を高めるため算出期間 3 年間の全降水 量から全流出高を引いたものを不足分 ΔP として扱うこ ととした. ΔP は次のようになった.

#### $\Delta P = 0.0307 \text{ mm/hr}$

図5に、作成したタンクモデルによる算出結果を示す. 期間は既往の流出モデルでの算出時と同一期間である. 同定したパラメータは、表2である.結果は、観測値と 計算値がよく一致しており、既往の流出モデル(図3) のときのような低水流量の減少も見られず、作成したタ ンクモデルによる再現性を確認することができた.NSE も 0.88 となっており、モデルの再現性も高いといえる.



図5 流量の再現結果(美々川 作成した流出モデル)

表2 パラメータ(美々川 作成した流出モデル)

tank No.	a (1/hr)	h (mm)	b (1/hr)	s (mm)	$\Delta P$ (mm/hr)
1	0.0005	1.0	0.05	0	
2	0.0021	0	0.0048	0	0.0307
3	0.00015	0	0	760	

### 5. 他流域への汎用性

今回作成したモデルを,美々川と同じような特徴を持った苫小牧地域の2つの流域に適用し,汎用性について 検討を行う.

苫小牧地域に流れる小糸魚川と苫小牧川は,美々川と 同じように地表流域界よりも大きな地下水流域界を持つ と考えられている<sup>1)</sup>.しかし,これらの河川の地下水流 域界についての研究は行われておらず,地下水流域界が 不明確である.そのため,地表の流域面積で計算される 流出高を地表流域分,降水量から流出高を引いた不足分 を流出高に足したものを地下水流域分と仮定することで, 既知の地表流域面積から地下水流域面積を求め,地表流 出率fを仮定した.

小糸魚川と苫小牧川における 2000/12/1~2003/11/30 の期間で確認した全降水量  $\Sigma R$ , 全流出高  $\Sigma Q$  と, この 2 つの差より計算した地下タンクへ入力する  $\Delta P$ , また上 記の方法で求めたfはそれぞれ次の表のようになった.

表 3 小糸魚川と苫小牧川の全降水量,全流出高,ΔP, f (2000/12/1~2003/11/30)

	$\Sigma R$ (mm)	$\Sigma Q$ (mm)	$\Delta P \text{ (mm/hr)}$	f
小糸魚川	3648	7748.5	0.1560	0.654
苫小牧川	3648	4554.4	0.0345	0.834

小糸魚川と苫小牧川における,作成した流出モデルで NSE が最大になるようにパラメータを調整した算出結 果を図 6,図 7 に示す.またそれぞれのパラメータを表 4,表 5 に示す.算出期間は,水収支を調べた期間と同 様の3年間である.

作成したモデルでの NSE は、小糸魚川が 0.63、苫小

牧川が 0.55 となり、こちらも美々川流域と同様低水流 量の減少の改善が確認できた.

小糸魚川と苫小牧川は、美々川に比べ特にピーク流量 が大きく、本研究で作成したタンクモデルによる算出で は再現が難しい.この洪水流量は、河道近傍への降水に よって構成されているものだと考えられる<sup>1)</sup>.低水流量 部分は美々川流域の算出結果と同様観測値と算出値がよ く一致しているが、この洪水流量部分の再現性の低さに よって、*NSE* が低下しているものと考えられる.



図 6 流量の再現結果 (小糸魚川 作成した流出モデル)

表4 パラメータ(小糸魚川 作成した流出モデル)

tank No.	a (1/hr)	h (mm)	b (1/hr)	s (mm)	$\Delta P \text{ (mm/hr)}$
1	0.01	1.5	0.06	0	
2	0.0038	0	0.0048	0	0.156
3	0.00017	0	0	1620	



図 7 流量の再現結果(苫小牧川 作成した流出モデル)

	コモナル	アル	)
--	------	----	---

tank No.	a (1/hr)	h (mm)	b (1/hr)	s (mm)	$\Delta P$ (mm/hr)
1	0.0032	1.5	0.07	0	
2	0.0014	0	0.008	0	0.0345
3	0.00016	0	0	1120	

#### 6. おわりに

本研究では美々川流域を対象として,流域を地表シス テムと地下システムに分け,地下水の流入を考慮したタ ンクモデルを構築し,流出量の算出を試みた.

地表流域面積と地下水流域面積の比より求めた地表流 出率 f と,水収支で確認した不足分 ΔP を与えたタンク モデルを美々川に適用したところ,直列 3 段タンクモデ ルのときのような低水流量の減少も見られず,再現性を 確認することができた.直列 3 段タンクモデルでは 0.65 だった NSE も,構築したタンクモデルでは 0.88 まで上 昇した.

同一のタンクモデルを、水収支の合わない苫小牧地域 の2つの他流域へ適用したところ、こちらにおいても再 現性が確認でき、美々川流域と同様の構造をもつモデル で流出量の算出を行うことができた.

本研究で構築したタンクモデルは,地表流域界と地下 水流域界の一致しない流域の流出特性を反映しているモ デルといえる.またこのモデルをほかの第四紀火山流域 へ適用し,汎用性を確認する必要がある.

## 参考文献

 八田 茂実・秋野 隆英・藤井 清志,樽前火山流域の 流出特性について,水工学論文集,48巻,pp.349-354, 2004.

2) 斎藤 庸・米津 仁司・許成基・池田 光良, 支笏火山 灰地域の水文特性(その 2)-美々川およびその周辺流域 における地下水流域界-, 日本地下水学会 1998 年秋季 講演会講演要旨, pp.68-73, 1998.

3)池田 光良・三浦 均也・操上 広志,地下水温による 北海道美々川周辺の地下水流動解析,応用地質,40, vol.2, pp.70-85, 1999.

 4)長谷美 達雄,冬季降水における降雪の発生割合と地 上気温の関係(1)-発生割合の地域性と雨雪判別の的中
 率について-,雪氷,53巻,1号,pp.33-43,1991.

5)境 隆雄,河川の融雪流出に関する研究,土木学会論 文集, Vol. 95, pp.9-20, 1963.

6) 馬場 仁志・星 清・藤田 睦博, 蒸発散および浸透を 組み合わせた二段貯留関数型流出モデルの開発, 水文・ 水資源学会誌 14(5), pp.364-375, 2001.

7) 菅原 正巳, タンク・モデル―河川の流量を雨量から 算出する一つのモデルについて―, 地学雑誌, 94 巻, 4 号, pp.209-221, 1985.

8) 室井 秀夫,竹下 侑,足立 修一,時間領域における システム同定結果の評価指標について,計測自動制御学 会論文集, Vol.51, No.10, pp.736-743, 2015.

9) 高橋 輝好・馬場 仁志・大串 弘哉, 損失機構付二段 貯留関数モデルを用いた支笏火山灰地域における地下水 貯留の再現について, 第 44 回北海道開発局技術研究発 表会発表概要集, pp.790-797, 2001.