

沙流川流域における流域貯留量を考慮した洪水流出量の推定

Estimation of Runoff Amount Taking into Account Basin Storage Capacity in the Saru River Basin

室蘭工業大学 ○学生員 高橋 翔 (Sho Takahasi)
室蘭工業大学 正 員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
室蘭工業大学 学生員 中澤 辰哉 (Tatsuya Nakazawa)

1. はじめに

近年、日本各地において台風に伴う豪雨による被害が多発している。本来、台風は暖かい場所で発生し北上しながら収束へ向かう傾向があり、日本における台風被害の多くは本州・四国・九州にもたらされ、海水温度や気圧配置の条件によっては北海道にも上陸することがある。2003年8月8日～11日には台風10号が北海道に上陸し、水位の上昇により門別町で2名、日高町で1名の死者を出すなどの深刻な被害となった。また、全壊家屋は門別町では9戸、半壊は6戸、床上浸水は平取町で43戸、門別町で34戸など住居の被害も甚大であった。このように、北海道内においても台風に伴う豪雨の影響で大洪水が発生し、甚大な被害をもたらした事例がある。

臼谷ら¹⁾によれば、先行雨量が多く流域が湿潤状態にある場合には、少量の降雨であっても大規模な出水に至ることや逆に流域が乾燥状態にある場合にはまとまった雨が降っても全く出水しないことが一般的に起こりうる。ことが指摘されている。つまり、洪水時の流量には豪雨発生以前からの流域の湿潤状態が大きく影響していると推察され、洪水流出量を推定する上で流域貯留量を把握することが重要であると考えられる。

そこで、本研究では洪水時のみならず、洪水発生以前からの長期的な流域の水循環を考慮し、流域貯留量の推定に基づき、洪水時の流出量の推定を行った。具体的な推定手順は以下の通りである。

- 1) 対象流域をメッシュ分割し、それぞれのメッシュに各種気象データを補間することで、メッシュ単位でデータを整備する。
- 2) 熱・水収支法により、日単位で融雪量・蒸発散量を長期にわたって推定する。
- 3) 長期流出計算の過程で得られるタンクモデルの貯留量を流域の貯留量とみなし、洪水発生以前からの長期的な水循環を再現する。
- 4) 複数の洪水事例に対し、洪水発生前日の流域貯留量を初期条件として与え、レーダー雨量データを用いて時間単位の洪水流出量を推定する。

以上により、流域貯留量を考慮した洪水流出計算を行った。

2. 対象流域

対象流域は、図-1に示す北海道日高地方を流れ太平洋に注ぐ一級河川、沙流川(流域面積:1,350 km²)にある二風谷ダム上流域(流域面積:1,215 km²)である。沙流川はその源を日高山脈の熊見山(標高:1,175m)に発し、河床

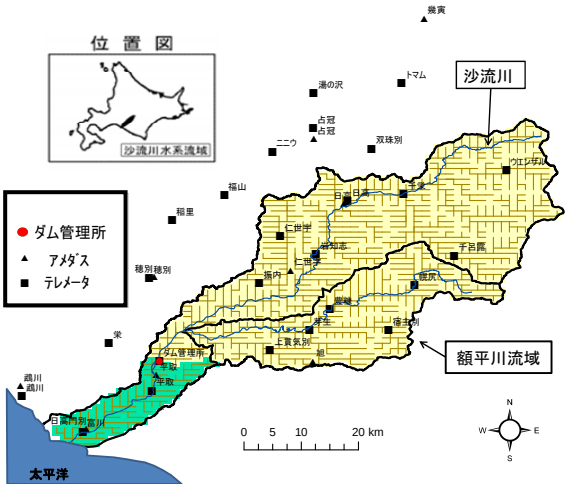


図-1 沙流川流域と観測所の位置

表-1 使用した気象データと地形データ

気象要素	気象官署	アメダス	二風谷ダム管理所	テレメータ
降雨量		8(平取除く)	1	25
気温		6(平取、旭、仁世宇除く)	1	
降雪量		4(鶴川、日高門別、旭、平取、仁世宇除く)		
積雪深		4(鶴川、日高門別、旭、平取、仁世宇除く)		
風速		6(平取、旭、仁世宇除く)	1	
日照時間	1(浦河)	6(平取、旭、仁世宇除く)	1	
日射量	1(浦河)		1	
湿度	2(浦河、苫小牧)		1	

地形要素	種別
標高	数値地図 50mメッシュ
地被	国土数値情報
傾斜角	
LAI	石井ら ²⁾ による解析結果

勾配が 1/50~1/700 の急流河川である。下流部には平取町が位置し、人口や資産が集積している。

3. 洪水時流出量の推定

(1) 基礎データの整理

長期的な水循環を考慮するにあたり、約 1km²に分割した流域(3 次メッシュ)に対して気象データを分布させるために補間を行った。補間、計算に用いた気象データおよび地形データの内訳と位置を図-1、表-1に示す。なお、データ数の不足を補うため、苫小牧や浦河を含む流域外に位置する 16ヶ所のデータも用いた。気象データの補間については、臼谷ら³⁾の手法を参考に、距離を重みとした手法によって行った。また、流出計算に用いる流入流出データについては、石狩川流域ランドスケープ情報⁴⁾を参考に任意メッシュの周囲に位置する東西南北

表-2 蒸発散量の推定結果および水収支(二風谷ダム)

年	降雨量	降雪量	流入量	水収支法	熱・水収支法	欠測日数
1998	1,319	564	1,567	316	509	92
1999	1,242	555	1,241	557	537	0
2000	1,104	768	1,349	523	530	1
2001	1,212	501	1,268	445	467	0
2002	956	519	917	558	511	0
2003	1,241	478	1,139	580	454	0
2004	1,061	637	1,095	603	522	2
2005	1,166	612	1,160	618	468	0
2006	1,275	537	1,408	404	468	0
平均値	1,175	575	1,238	511	496	11

単位 (mm/年)

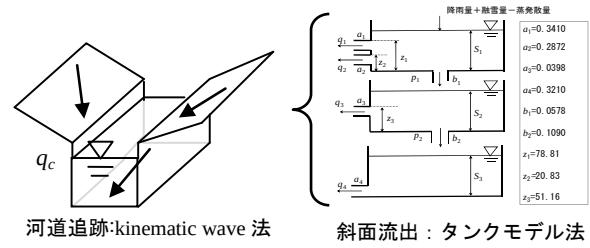


図-2 長期流出計算モデル図

の4メッシュから流下方向をいずれか1つに決定し、図-1に示す擬似的な河道網を作成した。

(2) 熱・水収支法による水文諸量の推定

解析期間はデータの蓄積が十分な1998年1月1日～2006年12月31日までの計9年間とし、日単位の観測データを用いた。一般的に、流域の水循環を的確に推定するためには蒸発散量、融雪量などの推定が不可欠であると考えられる。そこで、まず(1)で補間を行った気象データ(表-1)を各メッシュで入力し、気温と湿度から降雨量、降雪量の判別⁵⁾を行った。その後、熱・水収支法を適用し、融雪量と蒸発散量を推定した。熱・水収支法は次の基礎式(1)、(2)から構成される。

$$f_v R \downarrow + (1-f_v) \sigma T_v^4 - Q_G + Q_R = \varepsilon \sigma T_g^4 + H_g + \ell E_g \quad (1)$$

$$(1-f_v)(R \downarrow + \varepsilon \sigma T_g^4) = 2(1-f_v) \sigma T_v^4 + H_v + \ell(E_v + I) \quad (2)$$

ここで、式(1)は地表面の熱収支式、式(2)は植被層の熱収支式を表わす。 f_v は放射に対する植被層の透過率、 $R \downarrow$ は下向きの正味放射量(W/m^2)、 Q_G は地表面に供給される熱フラックス(W/m^2)、 Q_R は降雨によって供給される熱フラックス(W/m^2)、 H_g および H_v は地表面および植被層からの顕熱フラックス(W/m^2)、 ℓE_g および ℓE_v は地表面および植被層からの潜熱フラックス(W/m^2)、 ℓI は植被層からの遮断蒸発に伴う潜熱フラックス(W/m^2)、 T_g および T_v は地表面および植被層の代表温度(K)、 ε は射出率(土壌面=1.00、積雪面=0.97)、 σ はStefan-Boltzmann定数($=5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$)、 ℓ は蒸発潜熱($=2.50 \times 10^6 J/kg$)である。以上のモデルより蒸発散量と融雪量を推定した。

また、精度検証のために水収支法を用いて蒸発散量の推定を行った。なお、水収支法による蒸発散量の推定式は次式であらわされる。

$$E = R + S_w - Q \quad (3)$$

ここで、 E は蒸発散量(mm)、 R は降雨量(mm)、 S_w は降雪水量(mm)、 Q は流出高(mm)である。水収支を考慮する期間は1年間隔とした。

表-2には二風谷ダム上流域において熱・水収支法によって算出された蒸発散量を流域平均し年合計した値と水収支法によって得られた蒸発散量を示した。これらを比較すると熱・水収支法および水収支法で求めた蒸発散量は9ヵ年の平均で15mm/年程度の誤差であることがわかる。近藤ら⁵⁾によれば水収支法による蒸発散量は±100mm/年を推定誤差としているため本研究の推定結果は誤差の範囲内であると言える。しかし、1998年に関しては水収支法での蒸発散量が過小に算出されている。これは、二風谷ダムでの流量観測が1998年の4月から始まっているため、1～3月を全て欠測として取り扱っている

ことが原因と考えられる。

(3) 長期流出計算

(2)によって得られたメッシュ単位の融雪量、蒸発散量、降雨量を入力値として長期的な流出計算を行った。長期流出計算のモデル概要図を図-2に示す。各メッシュで斜面流出計算と河道追跡計算を行う構成となっている。メッシュ内の斜面流出量は3段タンクモデルによって計算を行った。なお、モデルパラメータは実測の流量を再現するように調整を行っており、全メッシュで同一の値を用いることとした。河道追跡計算にはkinematic wave式を変形した次式を用い、差分法して計算を行った。

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i_c^{0.3} q_c^{0.4}}{n_c^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial q_c}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

ここで、 q_c は流量(m^3/s)、 n_c は粗度係数($m^{-1/3}s$)、 i_c は河道勾配、 B は河道幅(m)である。粗度係数は0.04、河道勾配はメッシュ標高差および距離から決定し、河道幅については山口ら⁶⁾の提案式を参考に流域面積に対応して変化する次式を用いた。

$$B = 3.476 A^{0.435} \quad (5)$$

ここで、流域面積 A はメッシュ面積の積算値として求められる。以上の手法により、二風谷ダム観測所での長期的な流出の再現計算により得られた結果を図-3に示す。図によると、洪水時の流出のみならず、平常時の流出まで再現できていることから、再現流量の妥当性を示したといえる。次に、タンクの貯留量の計算結果を図-4に示す。精度検証は実測データが存在しないため不可能であるが、流量の再現性が得られていることを鑑みると、妥当な値を示していることが推測できる。本研究では流量を的確に再現できることから、タンクの貯留量を流域貯留量とみなせるものと考えた。

(4) 洪水流出計算

洪水時の流量は短時間に急激に増加するため、強い非線形性が現れる。そこで、洪水時の流出計算には長期流出計算とは異なるモデルを用いる。一般に、洪水時の流量は土壌の湿潤状態に依存すると考えられている。そのため、洪水流量の再現は(3)で得られた流域貯留量を考慮して行うこととした。洪水時の全流出量は直接流出と地下水流出に分けられ、直接流出量(=全流出量-地下水流出量)を全降雨量で除したものを流出率とした。流出率の決定には次式であらわされる山田ら⁷⁾の提案式を用いた。

$$f_i = 1 - \frac{\exp(-\alpha S_1)}{\alpha \int_0^t r dt} \left\{ 1 - \exp\left(-\alpha \int_0^t r dt\right) \right\} \quad (6)$$

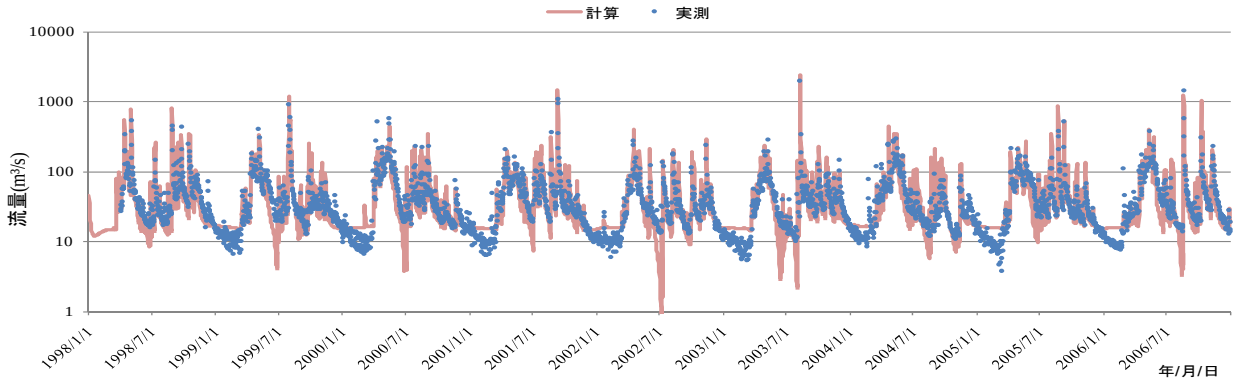


図-3 長期流出計算結果(二風谷ダム)

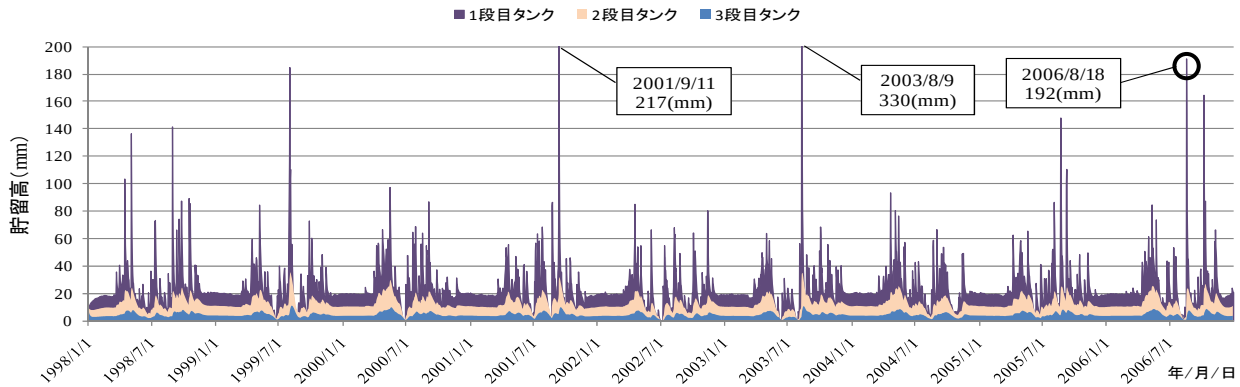


図-4 タンク貯留量の推移(二風谷ダム上流域)

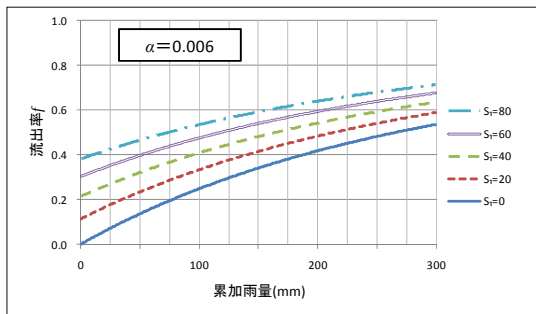


図-5 流出率推定曲線

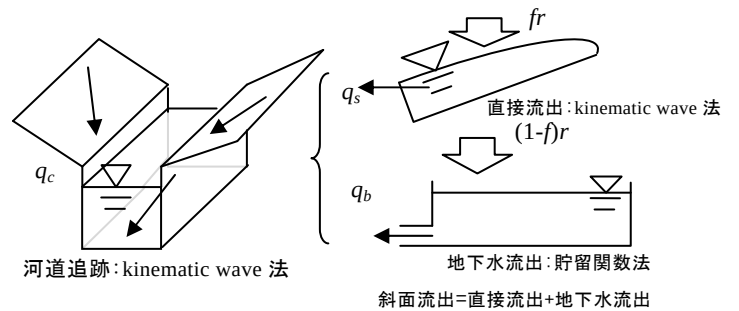


図-6 洪水流出計算モデル図

ここで、 f_i は降雨開始からの流出率、 S_1 は降雨開始前日における1段目タンク貯留高(mm)、 r は雨量強度(mm/h)、 α は未知定数(1/mm)である。本研究では直接流出成分の流出率を考慮するため S_1 を採用している。 S_1 と流出率の関係を図-5に示す。なお、 α は流域の特性をあらわす定数であり、本来であれば臼谷ら⁸⁾の手法のように複数の出水事例から求められるべきであるが、本研究では試行錯誤により $\alpha=0.006$ と一定とした。以上で得られた流出率を用いて斜面流出の流出成分を直接流出と地下水流出に分離して計算を行い、河道網による追跡計算を行って洪水時の流量を推定した。洪水流出計算のモデルの概要を図-6に示す。

直接流出成分の計算式は次式であらわされる kinematic wave 法を用いることとした。

$$\begin{cases} \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial t} = fr \\ q_s = \beta h_s^p, \beta = \sqrt{i_s}/n_s, p = 5/3 \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 h_s は斜面の水位(m)、 q_s は単位幅流量(m^2/s)、 f は式(6)によって得られる流出率、 r は雨量強度(m/s)、 i_s は斜面勾配、 n_s は等価粗度($m^{-1/3}s$)である。等価粗度は土地被覆によって変化するため、文献値^{9),10)}を参考に与えた。また、降雨量は気象庁提供のレーダーアメダス解析雨量を用いている。

地下流出成分の計算には次式であらわされる2段タンク型貯留関数法¹¹⁾の地下流出を計算する2段目タンク部分を適用した。

$$\begin{cases} s = k_1 q_b + k_2 dq_b/dt \\ ds/dt = (1-f)r - q_b \\ k_1 = c_1 k_2, k_2 = (c_3 - 1)/c_0 \\ c_0 = (\delta/T_c)^2, c_1 = \delta^2/T_c \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 s は貯留高(mm)、 q_b は地下流出成分流出高(mm/h)、 c_3 はモデル定数、 δ は減衰係数(=2.1)、 T_c は地下流出成分の時定数である。パラメータは $c_3=2.0$ 、 $T_c=20$ で一定とした。

また、河道追跡計算については式(4)と同様に kinematic

wave 法を用いて時間単位の流出量を算出した。

二風谷ダム上流域において、洪水流出の再現を3事例を対象に行った。流域貯留量を考慮して流出率を時々刻々と変化させた場合と流出率を0.6に固定し、計算を行った場合の結果を図-7に示す。図によると流出率を一定とした場合に比べ、流域貯留量を考慮して流出率を設定した場合の方が、立ち上がり部分とピーク部分において、概ね良好な再現性が得られている。とくに立ち上がり部分では土壌が徐々に湿潤化する過程が再現結果に反映され、過大な推定が解消されている。しかし、ピーク後の減衰部分などでは課題が残る。これは、今回の事例では立ち上がりとピークの再現を重視したパラメータ設定を行ったためと考えられる。

また、表-3には計算を行った各事例の相対誤差とその平均値を示す。表に示す「貯留量考慮」とは貯留量を考慮した場合、「流出率固定」とは流出率を0.6に固定した場合の相対誤差である。これより、流域貯留量を考慮した場合の方が相対誤差が減少することがわかり、平均値で比較すると0.4程度小さい。そもそも流出率は土壌水分の状態に変化するものであり、そのことを考慮したこと本手法の優位性が実証された。

4. まとめ

本報告において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 二風谷ダムの上流域を対象として、熱・水収支法より流域の特性を考慮し、流域貯留量を推定できた。
- 2) 対象流域において、複数の事例での洪水時流出量を同じパラメータにより再現できたことから、洪水流出計算の一般性を確認できた。
- 3) 洪水流出計算において、流域貯留量を考慮し流出率を時々刻々と変化させた場合、流出率を固定した場合よりも計算精度が向上することが確認できた。

謝辞: 本研究の一部は国土交通省河川砂防技術研究開発公募(地域課題分野)の助成を受けて行ったものである。また、本論文をまとめるにあたり室蘭開発建設部、気象庁に資料の提供等でご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 臼谷友秀, 中津川誠: 流域貯留量を考慮した流出計算の汎用性について, 土木学会工学論文集, 第56巻, 2012. (印刷中)
- 2) 石井孝, 梨本真, 下垣久, : 衛星データによる葉面積指数 LAI の推定, 水文・水資源学会誌, Vol.12, No.3, pp.210-220, 1999.
- 3) 臼谷友秀, 工藤啓介, 中津川誠: 石狩川を対象にした水循環の定量化, 北海道開発土木研究所月報, No.628, pp.18-34, 2005.
- 4) (財)北海道河川技術防災研究センター: 石狩川流域ランドスケープ情報, 1998.
- 5) 近藤純正著: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.
- 6) 山口甲, 新庄興, 三田村一弘, 上野順也: 豊平川の生産土砂について, 土木学会北海道支部論文報告集,

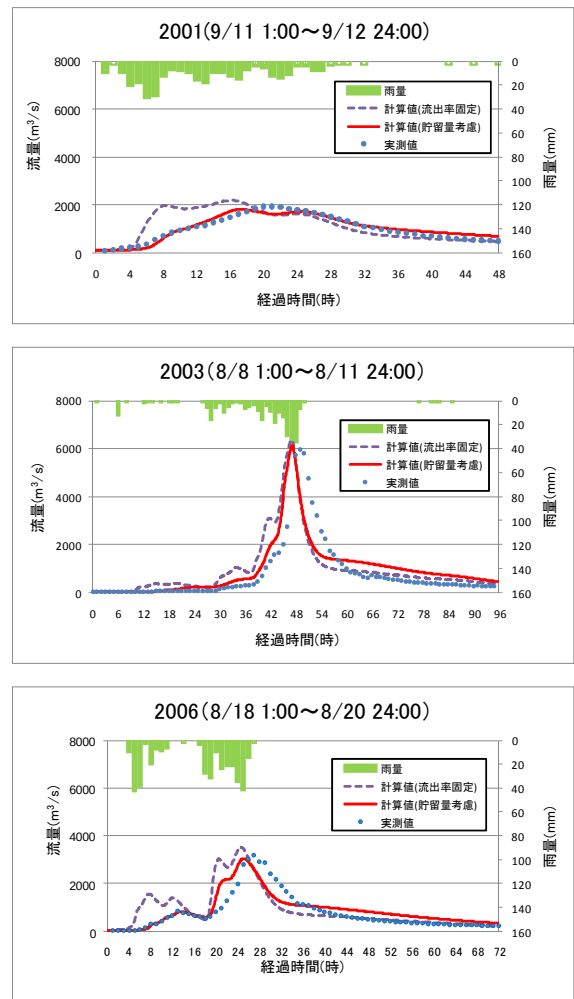


図-7 洪水流出計算結果

表-3 各事例の相対誤差

事例	貯留量考慮	流出率固定
2001/9/11~9/12	0.19	0.34
2003/8/8~8/11	0.91	1.73
2006/8/18~8/20	0.48	0.78
平均	0.53	0.95

$$\text{相対誤差} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|q_{oi} - q_{ci}|}{q_{oi}} \left(\begin{array}{l} q_{oi}: \text{実測流入量 (m}^3/\text{s)} \\ q_{ci}: \text{計算流入量 (m}^3/\text{s)} \\ N: \text{データ数} \end{array} \right)$$

第55号(B), pp.268-271, 1998.

- 7) 山田正, 山崎幸二: 流域における保水能の分布が流出に与える影響について, 第27回水理講演会, pp.385-392, 1983.
- 8) 臼谷友秀, 中津川誠: ダム機能向上のための流域貯留量の定量化, 河川技術論文集, 第17巻, pp.299-304, 2001.
- 9) 社団法人 土木学会: 水理公式集[平成11年度版], pp.40, 2000.
- 10) 中澤辰哉, 中津川誠: 鶴川流域における降雨履歴が流出に与える影響について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第67号(B), 2011.
- 11) 北海道開発局: 北海道開発局洪水予測システム, pp.24-26, 2007.