

## 18. 空堀川流域の長期流出特性の解析

### Long Term Runoff Analysis in the Karabori River Basin

技術支援課 杉原大介、高崎忠勝、岩屋隆夫

#### 1. はじめに

空堀川は、東京北西部を流域として、狭山丘陵の野山北公園を源と発し、東大和市高木付近で支流の奈良橋川と合流し、清瀬市中里で柳瀬川に合流する流域面積 26.8km<sup>2</sup>、法定延長 15.0km を有する荒川水系の一級河川である(図 1 参照)。空堀川は、流水がほとんどなく川底が露出してしまふ瀬切れがしばしば発生し、そのことが河川の維持流量確保の視点から問題となっている。一方で、空堀川における瀬切れを含めた流況の把握のための調査は行われてなかった。このため、2006 年度から水防災情報システムのテレメータのある箇所において流量観測を実施している。本報告では、空堀川でこれまで行った流量観測の結果について整理するとともに、丸山橋上流域を対象に 2004 年 9 月 1 日から 2006 年 12 月 31 日までの水文データからタンクモデルにより降雨流出解析を行い、流況特性を考察した。

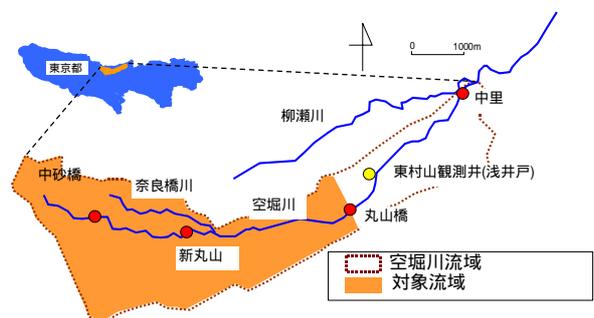


図 - 1 空堀川流域

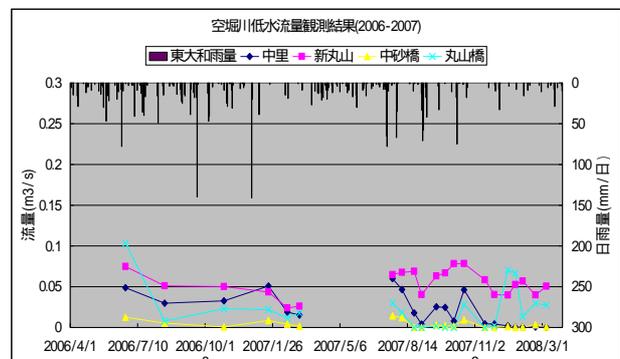


図 - 2 低水流量観測の結果

#### 2. 低水流量観測の結果

平常時の流量観測は、降雨の影響を受けない時の流量を把握するために、原則的に晴天の日が 2 日以上連続した日の翌日に行った。図 2 のとおり 2006 年度は 6 月から 3 月まで、2007 年度は 7 月から 3 月まで実施した。中砂橋、新丸山、丸山橋、中里における流量は、0m<sup>3</sup>/s から 0.1 m<sup>3</sup>/s の範囲内であり、必ずしも下流の流量が上流よりも大きいという結果にはならなかった。流量が 0 m<sup>3</sup>/s となる瀬切れは、中砂橋で 2007 年 8,9,12 月に、丸山橋で 2007 年 8,9,10,12 月に発生した。

#### 3. 高水流量観測の結果

高水流量観測は、時間 10mm 以上のまとまった降雨が予想される日に実施することとし、中砂橋と丸山橋において 2007 年 7 月 15 日(台風 4 号)、7 月 30 日、9 月 5~7 日(台風 9 号)に実施した。図 - 4 と図 - 5 は、中砂橋と丸山橋における水位と流量の観測結果である。丸山橋では 9 月 7 日に 67.84m(A.P.)、22.30m<sup>3</sup>/s を、中砂橋では 9 月 7 日に 109.80m(A.P.)、1.77m<sup>3</sup>/s を観測した。

観測で得た水位と流量データから、図 - 3 のとおり 2 次曲線式と n 次曲線式による水位流量曲線を作成した。2 次曲線式による低水流量は、観測流量よりも小さくなる傾向であった。一方、n 次曲線式による低水流量は、観測流量を十分に近似することができたため後述する降雨流出解析ではこれを採用した。

$$Q = a \times (H + b)^2 \dots \dots \dots 2 \text{次曲線式}$$

$$Q = a \times (H + b)^n \dots \dots \dots n \text{次曲線式}$$

$$Q = 13.00 \times (H - 66.41)^{1.62} \dots \dots \dots \text{丸山橋}$$

$$Q = 3.69 \times (H - 109.10)^{1.88} \dots \dots \dots \text{中砂橋}$$

ここで a,b,n は定数、Q は流量(m<sup>3</sup>/s)、H は水位(m) であり、丸山橋の H はテレメータ水位、中砂橋の H は量水標水位である。中砂橋のテレメータは、平常時水位よりも高い位置に水位感知点があるため、テレメータ水位による水位流量曲線を作成することができなかった。n 次曲線の定数である a,b,n は、SCE-UA 法により式 ( 1 ) が最小となるよう同定したものである。SCE-UA 法は、効率的な自動最適手法として、複数の定数をもつ式の同定手法として多く用いられている。

$$XL = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(Q_{oi} - Q_{ci})^2}{Q_{oi}} \dots \dots \dots \text{式 ( 1 )}$$

Q<sub>o</sub> は観測流量(m<sup>3</sup>/s)、Q<sub>c</sub> は計算流量(m<sup>3</sup>/s)、N は総解析個数である。

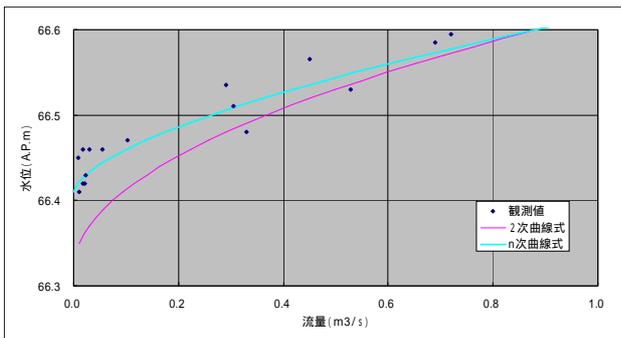


図 - 3 n 次式と 2 次式による水位流量曲線

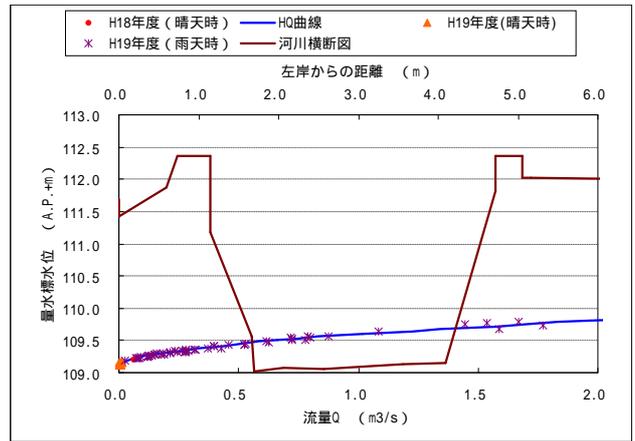


図 - 4 中砂橋における流量観測結果

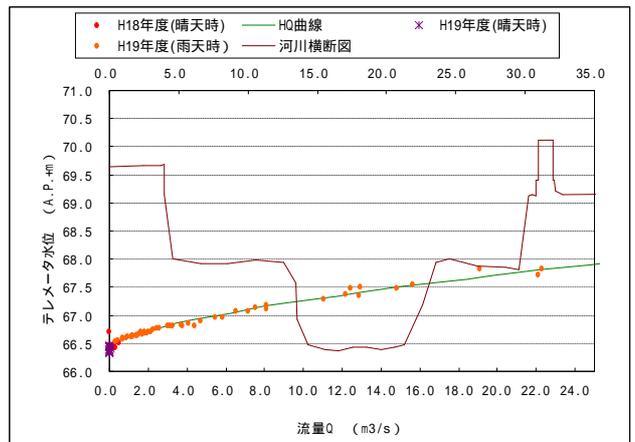


図 - 5 丸山橋における流量観測結果

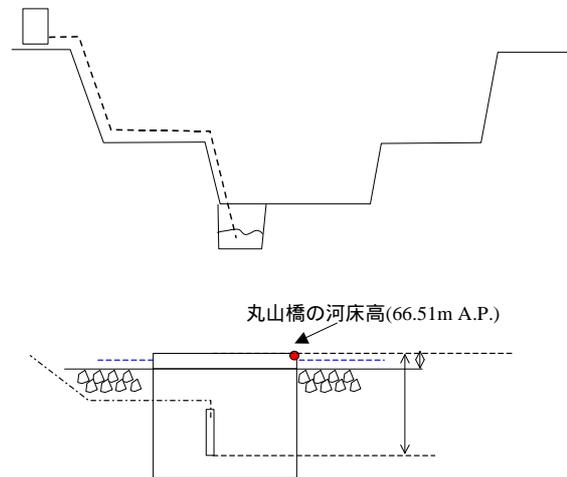


図 - 6 丸山橋水位観測所断面図

### 3. 丸山橋における観測

#### 1) 水位観測

図 6 は、丸山橋における水位計の設置状況である。丸山橋水位観測所では、水位を感知するセンサー一部が、図 6 のように河床下の柵の中に設置されていることから、河床下における水位を観測することが可能と思われる。このことを検証するために、

図 7 のように水位計センサーの周辺に 5 箇所のストレーナーを設置し、水位計の水位と周辺の実測水位を比較した。ストレーナーは、図 8 のように内径 5cm の等間隔でスリットが入っている塩ビ管に、目詰まりシートと採石をはわせたもので、河床下約 1m の深さまで挿入した。

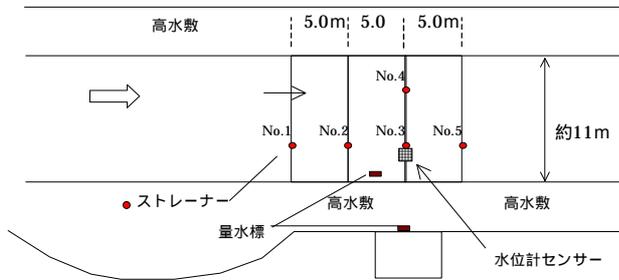


図 - 7 ストレーナー設置位置図

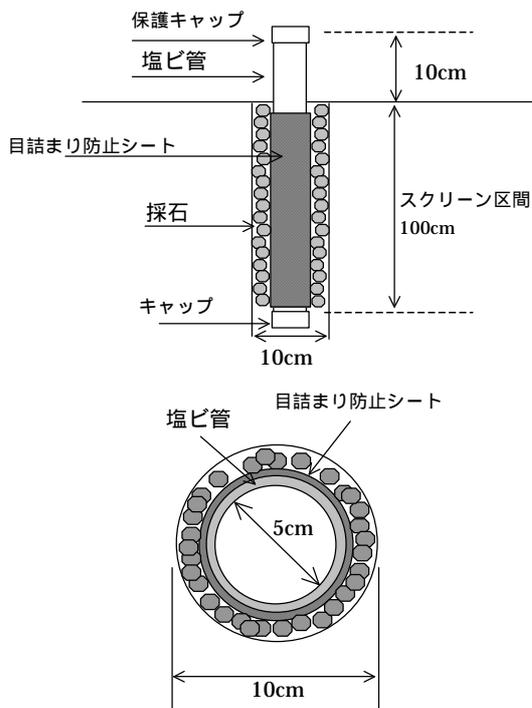


図 - 8 ストレーナー概要図

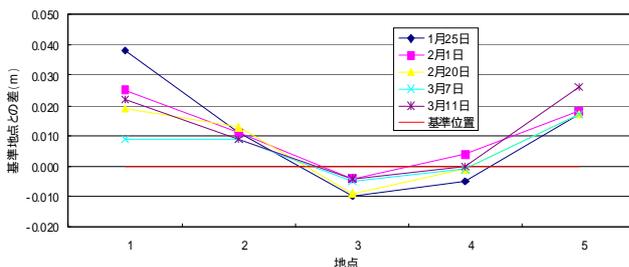


図 - 9 No.1 ~ No.5 の水位と水位計水位との比較図

観測は、2008年1月25日、2月1日、2月20日、3月7日、3月11日の5回実施した。いずれの日も河川の表流水がなくなることはなく、河床以下の水位を観測することができなかった。図 - 9 は、各観測日毎における水位計水位（以下基準点）とストレーナーの水位を比較したものである。基準点よりも上流に位置する No.1 と No.2 の水位は、基準点よりも約 1 ~ 4cm 高く、基準点と同じ位置又は下流にある No.1 ~ 3 は、基準点から -1cm ~ 3cm の差であった。

## 2) トレーサ試験

瀬切れ発生時に、河床下において水の存在が明らかになれば、河床下において伏流水という形で水の流れがある可能性がある。このことを検証するために、1)で設置したストレーナーを用いてトレーサ試験を実施した。トレーサ試験は一般的に地下水の流動を把握するために用いられる試験である。本調査は、上流 (No.1) のストレーナーに標準的な濃度 35‰ の食塩水を注入し、下流部のストレーナー及び水位計センサー柵において、導電率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 及び塩分濃度 (‰) を測定した。

図 - 10 は、ストレーナーの表層における塩分濃度の時間的推移を表したものであるが、食塩水を注入した No.1 で、注入直後の濃度は約 9‰であったが、約 10 分程度で注入前の濃度に戻った。他のストレーナーでは濃度の変化が見られなかった。図 - 11 は、ストレーナーの下層付近における塩分濃度の時間的推移を表したものである。食塩水を注入した No.1 において、注入直後の濃度は、約 15‰であり、約 60 分後に注入前の濃度に近づいた。No.2 ~ No.5 のストレーナーでは濃度の変化が見られなかった。食塩水を注入した下流のストレーナーで、塩分濃度の変化がなかったことについては、以下のことが考えられるが、推論の域をでないため、今後は観測方法を見直すなどにより改善していきたい。河川水よりも食塩水の方が比重が大きいため、河川方向に流れるよりも、鉛直方向に食塩水が移動してしまう河床下を流れる流向が、河川と平行していない。ストレーナーの間隔が 5m であったが、間隔が大きすぎるため下流にいくまでに希釈してしまう。

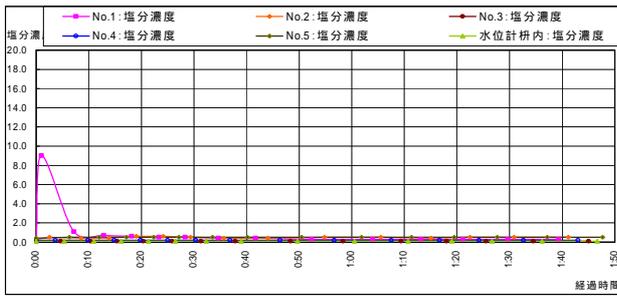


図 - 10 ストレーナー表層の塩分濃度の変化

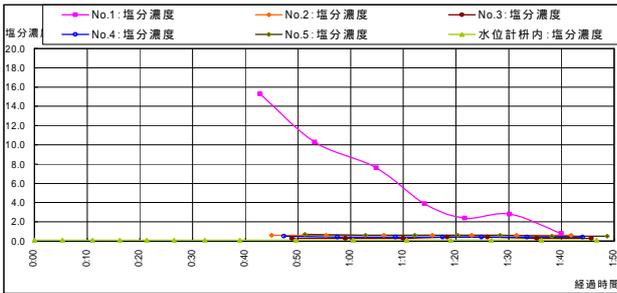


図 - 11 ストレーナー下層の塩分濃度の変化

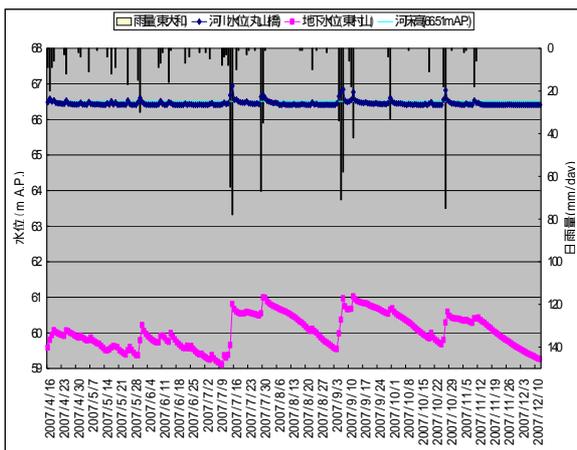


図 - 12 水位計水位と地下水位の比較

### 3) 水位計水位と地下水位

図 10 は、2007 年 4 月 16 日から 12 月 12 日における丸山橋水位と丸山橋から約 1km 下流に位置する東村山観測井の地下水位を比較したものである。地下水は、59～61m(A.P.)の範囲内で変化し、大きい降雨とともに水位が上昇し、降雨終了後は、次の大きい降雨まで水位がさがっていく傾向にある。一方、丸山橋水位は、降雨とともに水位が上昇するが、降雨終了後は、数時間程度で河床付近まで水位が低下する。

## 4. 流出解析による流況特性の把握

瀬切れ発生の有無は、流域内に降った雨量、無降雨期間、流域地下の涵養量などの影響を受けると考えられる。そこで、観測やテレメータから得た雨量や流量等をもとに雨量と流量の関係を表現する流出モデルを構築した。流出モデルには様々なものがあるが、野川の瀬切れを表現するのに有効であったタンクモデルを採用した。このモデルにより降雨流出解析を行い、解析結果からその流況特性を考察した。

### 1) 降雨流出モデル

降雨流出モデルは、図 13 に示す 4 段のタンクモデルを用いた。空堀川では、河川流量が 0 になる瀬切れが問題になっていることから、これを再現するために 4 段目タンクに浸透孔 (B4) 及び流出孔高さ (Z4) を設定した。空堀川と同様に瀬切れが問題になっている野川において同モデルを適用した結果、瀬切れを良好に再現することを確認している<sup>1)</sup>。計算は、最上段タンクに日雨量(mm/day)を入力し、タンク側方からの総流出量(mm/day)を解析地点における計算流出高とした。日蒸発散量は上段のタンクから差し引くが、差し引くことができなかった場合は下段のタンクから差し引いた。

値を決める必要のあるモデル定数は、流出孔の大きさ (A11, 12, A2, A3, A4)、流出孔の高さ (Z1, Z12, Z2, Z3, Z4)、浸透孔の大きさ (B1, B2, B3, B4)、初期貯留高 (H1, H2, H3, H4) の計 18 個である。

### 2) 流出解析データ

モデル定数の値を決定するのに用いる水文データは、2004 年 9 月 1 日から 2006 年 12 月 31 日までのものを用いた。

日雨量は観測地点上流域の流域平均雨量とし、表 - 1 に示した対象流域付近位置する雨量観測所のデータについて欠測値や異常値が含まれるデータを除外しティーセン法により計算した。

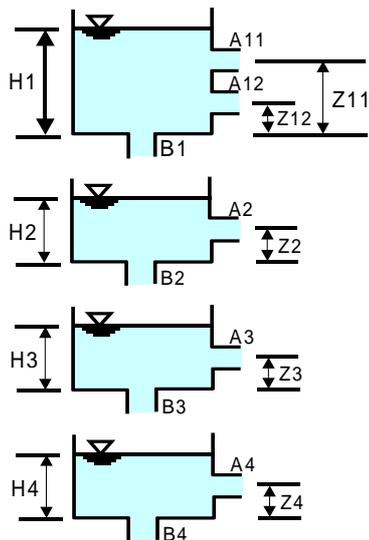


図 - 13 使用したタンクモデル

表 - 1 雨量観測所

観測所名	場所	観測所名	場所
青梅	青梅市東青梅3-20-1	下砂橋	立川市上砂町5-4-13
立川	立川市柴崎2-15-19	一里塚橋	国分寺市東元町3-36
中里	清瀬市中里2-1570	小平公園	東村山市萩山町1-16-1
東大和	東大和市高木3-245	国立	国立市谷保2686-32
東久留米	東久留米市大門2-14	東村山	東村山市思多町4-16

日蒸発散量は、Hamon (ハーモン) の式 (2) を用いた。

$$E_p = 1.40 \times D_0^2 \times P_t \dots \dots \dots \text{式 (2)}$$

$E_p$  は日平均蒸発散能(mm/day)、 $D_0$  は日照時間 (12hr/day)、 $P_t$  は日平均気温に対する飽和絶対湿度 ( $\text{gm/m}^3$ ) である。日平均気温は、気象庁所管の青梅観測所のデータを用いた。

### 3) モデル定数の決定

タンクモデル定数は、式 (4) の誤差評価関数 RMSE の値を最小とするモデル定数を SCE-UA 法によって探索した。

誤差評価関数 RMSE は、野川の流出解析においても用いた月降水量等を正規化する時によく使用される立方根変換を採用した。

観測流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )は、式 (3) により観測流出高 (mm/day) に置き換えた。

$$Q_o = \frac{86.4 \times q_o}{A} (\text{mm/day}) \dots \dots \dots \text{式 (3)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sqrt[3]{Q_{oi}} - \sqrt[3]{Q_{ci}})^2} \dots \dots \dots \text{式 (4)}$$

ここで、 $A$  は流域面積( $\text{km}^2$ )、 $q_o$  は観測流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $Q_o$  は観測流出高 (mm/day)、 $Q_c$  は計算流出高 (mm/day)、 $N$  は総日数(day)である。SCE-UA 法による探索に際して事前に探索範囲を設定する必要がある。表 - 2 に示した探索範囲を設定し、モデル定数を探索した結果、表 - 3 の同定値となった。

### 3. 解析結果

解析期間は、2004年9月1日から2006年12月31日としたが、2005年9月から12月の水位データについては、異常値が見られたことから欠測扱いとした。図 14 は、観測流出高と計算流出高を比較したもので、欠測を除いた解析期間における総流出

表 - 2 探索範囲

定数	単位	探索範囲	定数	単位	探索範囲
A11	$\text{day}^{-1}$	0.1~1.5	Z11	mm	20~100
A12	$\text{day}^{-1}$	0.05~0.6	Z12	mm	10~40
A2	$\text{day}^{-1}$	0.025~0.45	Z2	mm	5~30
A3	$\text{day}^{-1}$	0.01~0.15	Z3	mm	0~30
A4	$\text{day}^{-1}$	0~0.06	Z4	mm	0~100
B1	$\text{day}^{-1}$	0.05~0.9	H1	mm	0~100
B2	$\text{day}^{-1}$	0.03~0.36	H2	mm	0~30
B3	$\text{day}^{-1}$	0.01~0.12	H3	mm	0~30
B4	$\text{day}^{-1}$	0~0.06	H4	mm	0~100

表 - 3 モデル定数

定数	単位	同定値	定数	単位	同定値
A11	$\text{day}^{-1}$	0.19444	Z11	mm	63
A12	$\text{day}^{-1}$	0.44179	Z12	mm	15
A2	$\text{day}^{-1}$	0.13074	Z2	mm	29
A3	$\text{day}^{-1}$	0.01481	Z3	mm	3
A4	$\text{day}^{-1}$	0.00084	Z4	mm	9
B1	$\text{day}^{-1}$	0.88878	H1	mm	68
B2	$\text{day}^{-1}$	0.28446	H2	mm	3
B3	$\text{day}^{-1}$	0.11970	H3	mm	15
B4	$\text{day}^{-1}$	0.03114	H4	mm	77

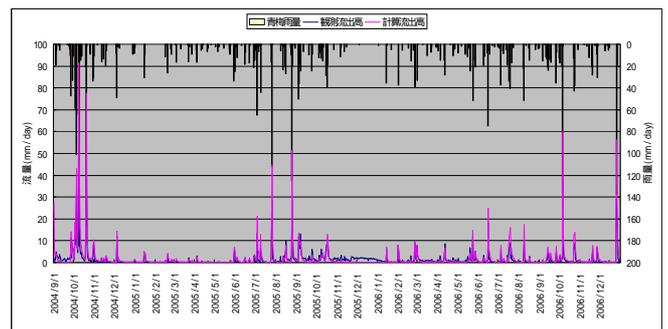


図 - 14 解析期間における流出高の変化

高は観測値 1,031mm、計算値 1,148mm で概ね良好な結果を得た。解析期間の総雨量 3,904mm に対して、表 - 4 のとおり総流出高の計算値は、1,246mm であり流出率は 32%であった。瀬切れが問題となっている野川と残堀川についても同モデルにより計算したところ、野川では流出率 13%であり、残堀川では流出率 26%であった。解析期間が違うため、単純比較はできないが、野川や残堀川と比較して雨水が河川に流出する割合が大きい傾向にある。

観測結果から、河川流出高が 0 となる時に瀬切れが発生することを確認している。欠測を除いた解析期間における流出高が 0 となる日数は、観測値 77 日間、計算値 29 日間であり、主に 2005 年 2 月から 6 月にかけて発生した。瀬切れの発生日数の再現性が十分でなかったため、今後は、観測データを蓄積していくと共にモデルの見直し等を図ることで、再

現性の向上を図りたい。

タンクモデルは、下段にいくほど長期的な流出に対応するが、1 段からの流出を表面流出と考えた場合、2・3・4 段目タンクからの流出は、空堀川の平常時の流量を表現するものと考えられる。図 15 は、丸山橋水位観測所から下流約 1km の位置にある東村山水位観測井の水位と 2・3・4 段目タンクの貯留高の和 ( $H_2+H_3+H_4$ ) を比較したものである。地下水位のピークは、2004 年 10 月 22 日に 62.47m(A.P.)、2005 年 9 月 8 日に 60.76m(A.P.)、2006 年 10 月 9 日に 60.98m(A.P.)であった。また、地下水位が最も低下したのは、2005 年 5 月 21 日に 57.83m(A.P.)、2006 年 2 月 20 日に 57.79m(A.P.)であった。2・3・4 段目タンクの貯留高の和は、地下水の動きと同様な変化を示す傾向があり、相関係数 0.84 と密接な関係があることが分かった。

表 - 4 残堀川、空堀川、野川におけるタンクモデルによる計算結果

河川	場所	解析期間	流域平均雨量 (mm)	計算流出高 (mm)	流出率
残堀川	青岸橋	2007年1月1日～2007年12月31日	999	264	0.26
空堀川	丸山橋	2004年9月1日～2006年12月31日	3,904	1,246	0.32
野川	小金井新橋	2005年1月1日～2005年12月31日	1,293	171	0.13

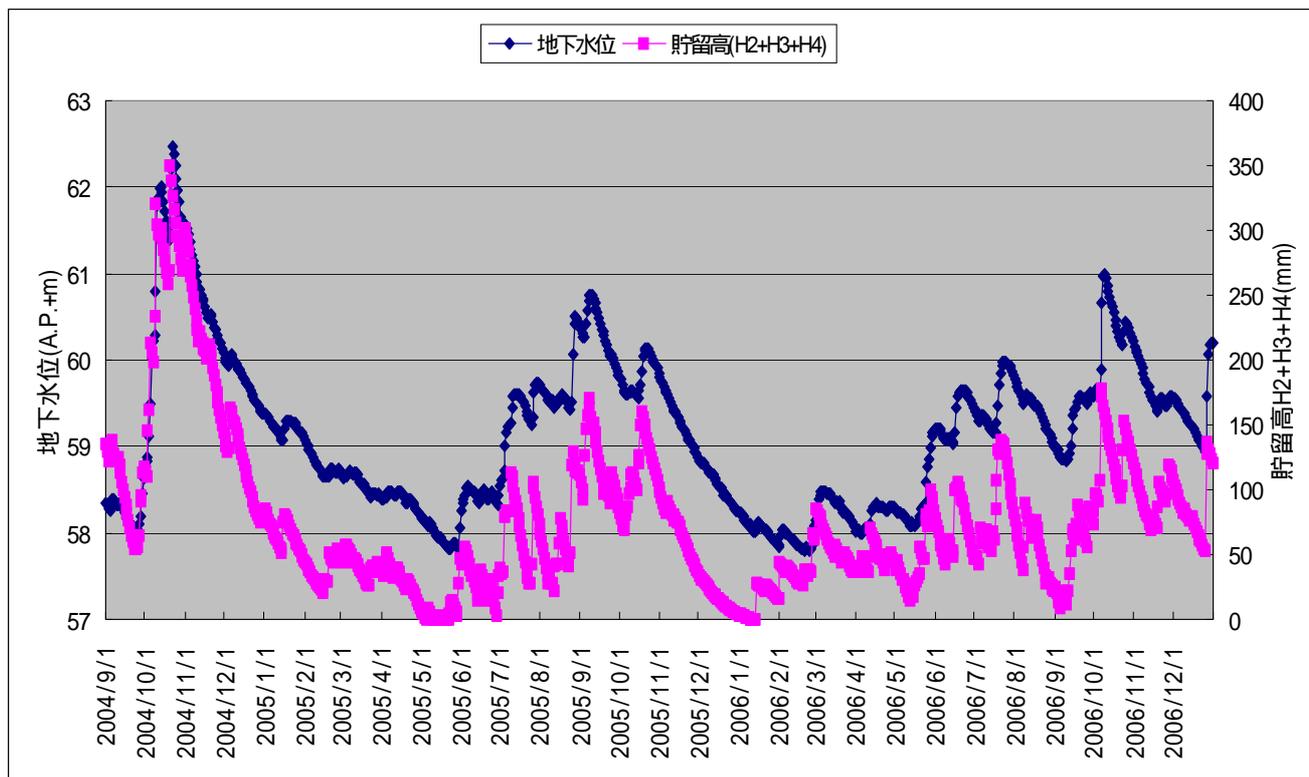


図 - 15 地下水位と貯留高 ( $H_2 + H_3 + H_4$ )

図 16 は、地下水位と 4 段目タンクの貯留高 (H4) を比較したものである。4 段目タンクの貯留高 (H4) が流出孔高さ (Z4=9mm) より小さくなる時に流出高が 0 となり、瀬切れが発生しやすくなるが、観測値と同じ時期である 2005 年 5 月に流出高が 0 となった。また、4 段目タンクの貯留高 (H4) と地下水の動きは、同様の变化を示す傾向にあり、相関係数 0.83 と密接な関係があることが分かった。

図 17 は、観測期間の毎日において、以降に雨が降らない場合に、何日で瀬切れが発生するかを推定

したものである。計算は、解析によって構築したタンクモデルに日単位の貯留高を入力し、対象とする日以降は、無降雨であると仮定して計算を行い流量が 0 になるのに要する日数を求めた。流量が 0 になるのに要する日数の各年の最大値は、2004 年 10 月 20 日に 75 日、2005 年 10 月 18 日に 51 日、2006 年 10 月 24 日に 49 日であり、各年の 10 月に位置する傾向にあった。このことから 11 月以降に降雨がない場合に、12 月末頃に瀬切れが発生する可能性があることが分かった。

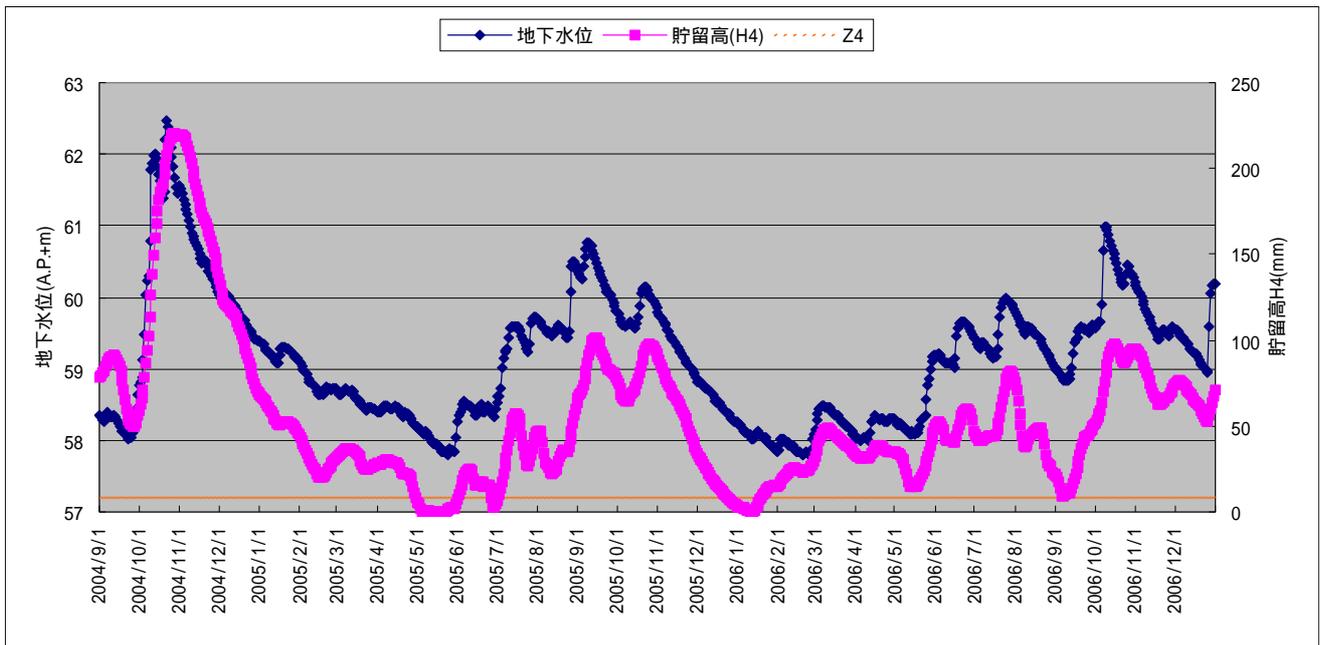


図 - 16 地下水位と貯留高 (H4)

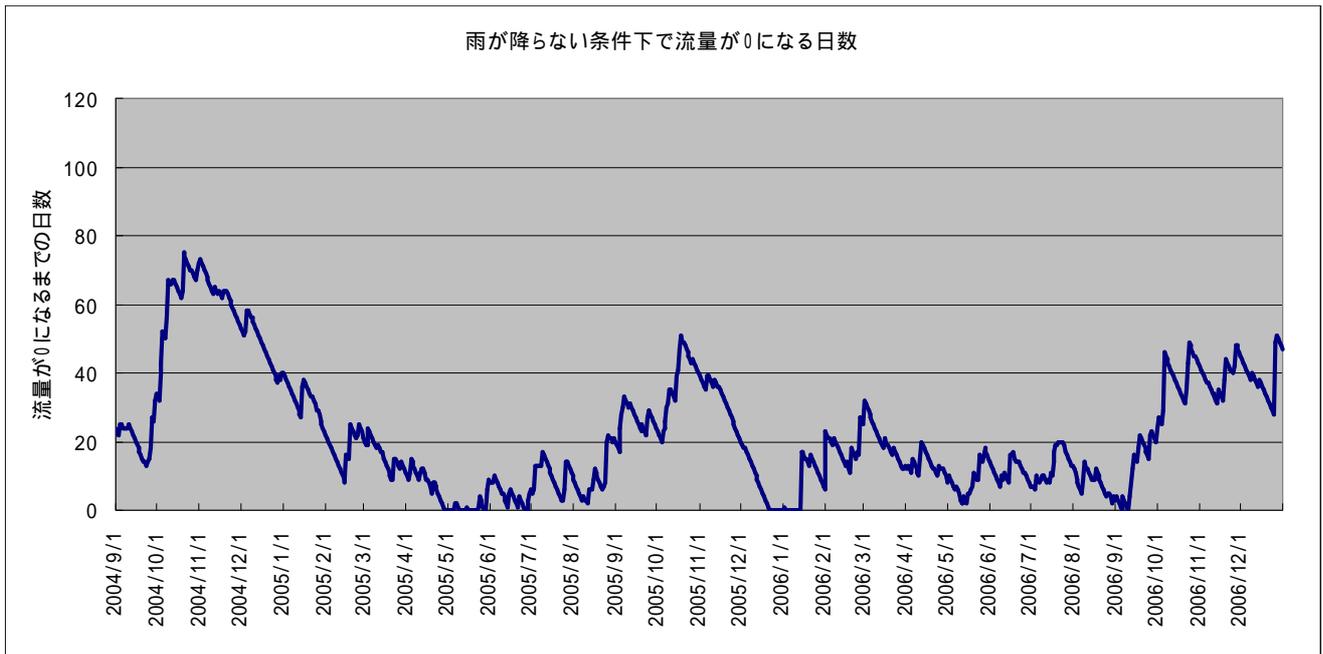


図 - 17 雨が降らない条件下で流量が 0 となる日数

## 5.まとめ

以下に本報告におけるまとめと今後の課題等を示す。

- ・ 2007年度の低水流量観測結果から中砂橋、新丸山、丸山橋、中里における流量は、 $0\text{ m}^3/\text{s}$ から $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ の範囲内であり、必ずしも、下流の流量が上流よりも大きいという結果にはならなかった。流量が $0\text{ m}^3/\text{s}$ となる瀬切れは、中砂橋で2007年8,9,12月に、丸山橋で2007年8,9,10,12月に発生した。
- ・ 丸山橋におけるストレーナーを用いた河床下の水位の調査については、観測日において河川の表流水がなくなることがなかったため、今後は、表流水がない時に調査を行う必要がある。
- ・ 丸山橋におけるストレーナーを用いた水位観測及びトレーサ試験については、瀬切れの日における観測の実施や観測方法を見直すなどにより改善を図りたい。
- ・ 空堀川丸山橋上流域における約2年4ヶ月の観測水文データに対して、タンクモデルを用いて長期流出モデルを構築し、SCE-UA法を用いてモデル定数を同定することで、現況の河川流量の変化を良好に再現できることが確認できた。
- ・ 平常時の流量を表現していると考えられる2・3・4段目タンクの貯留高の和及び瀬切れの発生の有無を表現する4段目タンクの貯留高は、地下水の動きと密接な関係があることが分かった。
- ・ 瀬切れの発生日数については、再現性が十分でなかったため、今後は観測データを蓄積していくと共にモデルの見直し等を図ることで、再現性の向上を図ることが望まれる。
- ・ 観測期間の毎日において、以降に雨が降らない場合に、何日で瀬切れが発生するかを推定した結果、各年の最大値は10月に位置する傾向にあった。このことから11月以降に降雨がない場合に、12月末頃に瀬切れが発生する可能性があることが分かった。

## 参 考 文 献

- 1)高崎忠勝、杉原大介、岩屋隆夫：野川流域の長期流出特性、都土木技術センター年報、49-55、2007
- 2)石原成幸、河合将文、川島眞一、高崎忠勝：野川上流域における地下水・湧水および河川環境、都土木技術センター年報、221-228、2006