

### 3. 野川流域の長期流出特性の解析

#### Long Term Runoff Analysis in the No River Basin

技術調査課 高崎忠勝、杉原大介、岩屋隆夫

#### 1. はじめに

近年、野川では写真-1に示したように河川流量が減少し川底が露出する瀬切れがしばしば発生している。地域住民と河川行政から構成される野川流域連絡会ではこうした状況の原因究明と対策の検討に取り組んでいる。建設局では瀬切れの解消に向けて河床に不透水層を設置する整備を進めている。不透水層の整備を進めることによって流水の浸透量が減少し瀬切れの状況が改善されることが期待される。河川行政においてはこうした整備をすすめると共に整備の効果を評価し説明することが求められている。

不透水層設置の効果を検証する方法として不透水層設置前後の河川流量を比較することが考えられるが、不透水層設置前後の降雨や地下水の状況が異なることから単純に河川流量を比較しただけでは河川流量の違いが不透水層の設置によるものであるのかを判断することができない。そこで不透水層設置前後の各期間について降雨と河川流量の変化をもとに雨水がどのように河川に流出するかを解析（降雨流出解析）し、不透水層設置前後の降雨流出特性に対して同じ条件を設定して計算した河川流量を比較することによって不透水層設置の効果を定量的に評価することが可能になる。

降雨流出特性の解析は一般に降雨と河川への流出量の関係を表す流出モデルを用いて行われる。流出モデルには様々なものがあるが、野川流域においてはこれまでにタンクモデルを用いた解析が行われている<sup>1)2)</sup>。タンクモデルは底面と側面に孔を有する容



写真-1 小金井新橋から上流を望む(2005/6/5)

器（タンク）を1個もしくは複数個配置して、流域の流出機構をモデル化するものであり、洪水時のような短期間の降雨流出現象から年間の水収支のような長期間の降雨流出現象まで再現性が高く、また、計算が容易であることから多くの降雨流出解析において用いられている。タンクモデルによる解析は、①タンクの配置及び各タンクの孔の数を定める、②観測流量と計算流量が極力等しくなるようにモデル定数（孔の高さや大きさ）を決定する、という手順になる。これまで、②のモデル定数の決定する作業は多くの試行錯誤によって値を決めることが一般的であり、良好な値を得るのに時間を要すると共に計算者が異なるとモデル定数の値が異なるといった問題があった。しかし、今日では計算機の処理速度の向上に伴い観測流量と計算流量の違いの程度を示す誤差評価関数の最適化問題としてモデル定数を自動的に探索させることが可能となっており、近年、SC

E-UA法や遺伝的アルゴリズム等の大域的探索法を用いた事例が多く報告されている<sup>3)4)</sup>。SCE-UA法はシンプレックス法、ランダム探索、競争進化、集団混合の概念を組み合わせたアルゴリズムを持つ大域的探索法であり、強力かつ効率的な自動最適化手法であることが報告されている<sup>5)</sup>。こうしたモデル定数の決定手法は観測流量を良好に再現するモデル定数の値を短時間かつ簡単に得られるだけでなく、異なる計算者が作業を行っても同じ値を得られる利点がある。

本報は野川における瀬切れの実態把握と不透水層設置の効果検証に向けて野川上流域を対象にタンクモデルによる降雨流出モデルを構築し観測水文データを用いてSCE-UA法によりモデル定数を決定する。決定したモデル定数を用いて流出計算を行い現況の降雨流出特性を解析するとともに解析結果と地下水及び湧水の観測データと比較することで構築したモデルの妥当性を検討するものである。

## 2. 対象範囲

野川は、国分寺市の東恋ヶ窪に源を発し、国分寺崖線の湧水を集めながら崖線下をほぼ南東に流下し、小金井市、三鷹市、調布市、狛江市を経て世田谷区世田谷区二子玉川付近で多摩川に合流する流域面積69.9km<sup>2</sup>の一級河川である。流域の市街化率は7割を越えている。

土木技術センターでは武蔵野公園に位置する小金井新橋観測所において河川水位の連続計測及び定期的に流量観測を実施していることから、小金井新橋観測所の上流域を対象範囲とした。流域面積は16.5 km<sup>2</sup>である。(図-1参照)

## 3. 降雨流出モデル

無降雨時の河川流量が問題となることから降雨流出特性の解析は長期間にわたる雨量と河川流量を日単位で計算するものとし、図-2に示した4段のタンクモデルを使用した。

長期流出特性の解析においては4段のタンクモデルが使われることが多いが、広く用いられているのは4段目のタンクに底面の孔(浸透孔)がなく、かつ側面の孔(流出孔)が高さ0の位置に付いているもので



図-1 対象流域

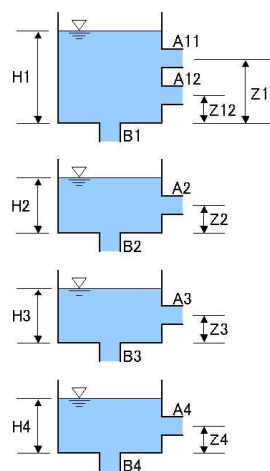


図-2 使用タンクモデル

ある。この場合、各タンクの流出孔からの流出量の合計を河川流量として取り扱おうと計算において河川流量が0にならないことから、4段目のタンクに浸透孔(B4)及び流出孔の高さ(Z4)を設けることで長期間に渡って流量が0となることに対応した。

計算は最上段タンクに日雨量を入力し、タンク側方からの総流出量を解析地点における日流量とした。日蒸発散量は上段タンクから差し引くこととしたが、差し引くことができなかった場合には下段のタンクから差し引いた。

計算に必要なとするデータは日単位の雨量と蒸発散量のみであるが、モデル定数の値の決定に際しては河川流量のデータも必要となる。

値を決める必要のあるモデル定数は、流出孔の大きさ(A11, A12, 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。

#### 4. 水文データ

モデル定数の値を決定するのに用いる水文データの期間は平成16年6月19日から平成18年12月10日である。以下に解析に用いたデータの作成方法を示す。

小金井新橋観測所では圧力式水位計により10分間隔で河川水位を計測しており、また、1～2ヶ月に1回の頻度で量水標によって河川水位を確認している。水位計が記録した水位と量水標で確認した水位を比較した結果、図-3に示したように水位計が記録した水位は流量が少ない時期の水位を正確に測定できていないことが明らかとなったことから、水位計が計測した水位データを最も近い時期の量水標水位を用いて補正を行い、補正水位データを作成した。流量データは補正水位データと流量観測結果から作成した水位流量曲線を用いて作成した。

流域平均雨量は東京都水防災総合情報システムの雨量観測所のデータを用いて計算した。表-1に示した対象流域付近に位置する観測所の雨量データについて1時間毎に欠測値や異常値を確認し、欠測値や異常値が含まれるデータの観測所を除外しティーセン法により流域平均雨量を計算した。

日蒸発散量は近藤が示した月別のポテンシャル蒸発量<sup>6)</sup>をもとに月別の日蒸発散量(表-2)を設定し、これと流域に占める浸透域の割合をかけたものとした。流域に占める浸透域の割合は国土地理院の細密

数値情報の1994年における土地利用データについて市川による土地利用に応じた損失率<sup>7)</sup>をもとに設定した浸透域率(表-3)を用いて算定した値56%を使用した。なお、雨量を観測した日は日蒸発散量を0とした。

表-1 雨量観測所

観測所名	場所	観測所名	場所
東大和	東大和市高木3-245	一里塚橋	国分寺市東元町3-36
小平霊園	東村山市萩山町1-16-1	鞍尾根橋	小金井市貫井南町4
立川	立川市柴崎町2-15-19	野川公園	小金井市中町1-1
国立	国立市谷保2686-32		

表-2 月別日蒸発散量

月	日蒸発散量	月	日蒸発散量	月	日蒸発散量
1月	1.81 mm/day	5月	4.13 mm/day	9月	3.13 mm/day
2月	2.00 mm/day	6月	4.13 mm/day	10月	2.61 mm/day
3月	2.84 mm/day	7月	3.77 mm/day	11月	1.97 mm/day
4月	3.77 mm/day	8月	4.71 mm/day	12月	1.77 mm/day

表-3 土地利用別浸透域率

コード	土地利用分類	浸透域率	コード	土地利用分類	浸透域率
1	山林・荒地等	0.8	9	中高層住宅地	0.6
2	田	0.6	10	商業・業務用地	0.2
3	畑・その他の農地	0.9	11	道路用地	0.1
4	造成中地	0.6	12	公園・緑地等	0.9
5	空地	0.7	13	その他の公共公益施設用地	0.3
6	工業用地	0.2	14	河川・湖沼等	0
7	一般低層住宅地	0.6	15	その他	0.5
8	密集低層住宅地	0.3			

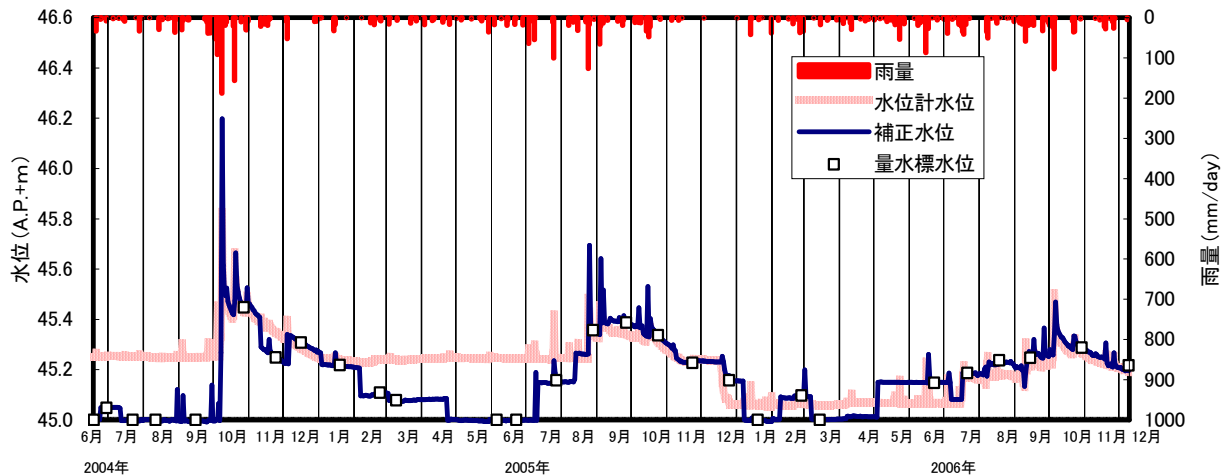


図-3 水位データ

## 5. モデル定数の決定

モデル定数の決定は式(1)の誤差評価関数RMSEの値を最小とするモデル定数の値をSCE-UA法によって探索した。

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

ここで、 $Q_o$  は観測流量 (mm/day)、 $Q_c$  は計算流量 (mm/day)、 $N$  は総日数 (day) である。

長期流出解析では洪水時にみられる大きな流量より無降雨時の小さい流量を主な対象とすることから誤差評価関数において流量を対数変換して評価することが多く行われている。しかし、解析地点においては長期間にわたり流量が0になるため対数変換を用いることができない。そこで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用いた。

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-4に示した探索範囲を設定し得られたモデル定数を表-5に示した。

## 6. 構築モデルの妥当性

得られたモデル定数(表-5)を用いて計算した結果、図-4に示した河川流量の計算値が得られた。なお、図中の流量は立方根変換による座標で示している。解析期間全体をみると、総流量は観測値516mm、計算値509mm、流量が0の日数は観測値252日、計算値

299日であった。1年間のデータが全て揃っている2005年についてみると、雨量は1293mm、蒸発散量は421mm、流量は観測値174mm、計算値171mmであり流出率は13%となる。

表-4 探索範囲

定数	単位	探索範囲	定数	単位	探索範囲
A11	day <sup>-1</sup>	0.100 ~ 1.5	Z11	mm	20 ~ 100
A12	day <sup>-1</sup>	0.050 ~ 0.6	Z12	mm	10 ~ 40
B1	day <sup>-1</sup>	0.050 ~ 0.9	Z2	mm	0 ~ 30
A2	day <sup>-1</sup>	0.025 ~ 0.45	Z3	mm	0 ~ 30
B2	day <sup>-1</sup>	0.030 ~ 0.36	Z4	mm	0 ~ 1000
A3	day <sup>-1</sup>	0.010 ~ 0.15	H1	mm	0 ~ 100
B3	day <sup>-1</sup>	0.010 ~ 0.12	H2	mm	0 ~ 30
A4	day <sup>-1</sup>	0 ~ 0.012	H3	mm	0 ~ 30
B4	day <sup>-1</sup>	0 ~ 0.012	H4	mm	0 ~ 1000

表-5 モデル定数

定数	単位	同定値	定数	単位	同定値
A11	day <sup>-1</sup>	0.100	Z11	mm	100
A12	day <sup>-1</sup>	0.050	Z12	mm	38
B1	day <sup>-1</sup>	0.635	Z2	mm	30
A2	day <sup>-1</sup>	0.025	Z3	mm	30
B2	day <sup>-1</sup>	0.360	Z4	mm	519
A3	day <sup>-1</sup>	0.010	H1	mm	0
B3	day <sup>-1</sup>	0.120	H2	mm	12
A4	day <sup>-1</sup>	0.0038	H3	mm	12
B4	day <sup>-1</sup>	0.0040	H4	mm	143

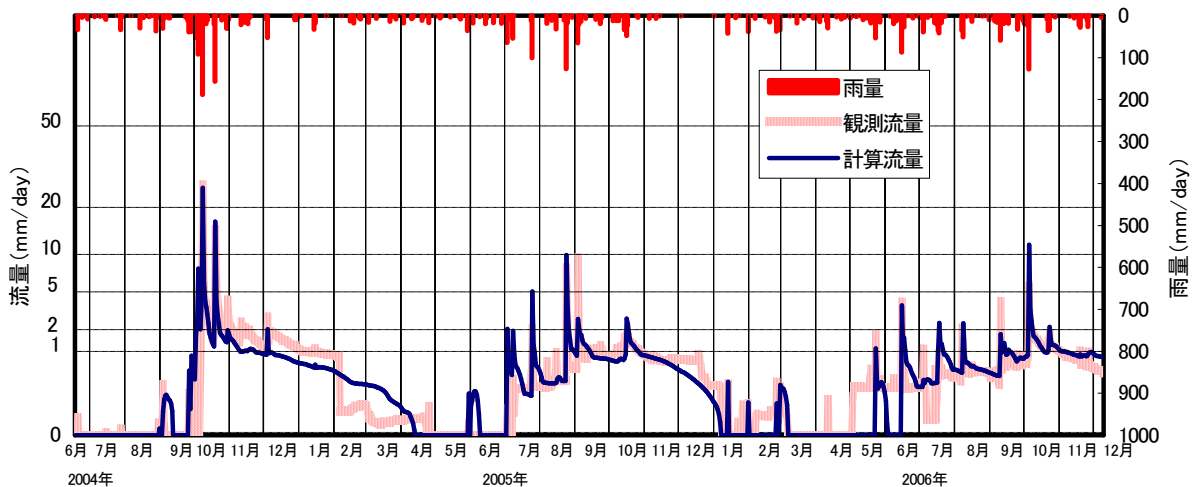


図-4 解析期間における流量変化

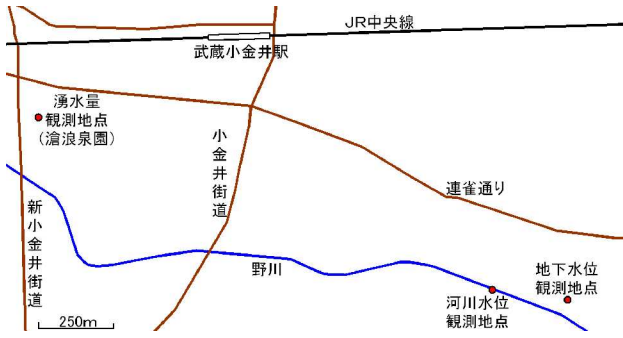


図-5 観測地点

また、流量が0の日数は観測値73日、計算値72日であった。構築したモデルは決定したモデル定数を用いることで流量が0の日数も含めて河川流量の変化を良好に再現している。

図-5に示した地点で観測している湧水と地下水位のデータとタンクの貯留高を比較して構築したモデル

の妥当性を考察する。小金井新橋観測所の上流域に位置する滄浪泉園内の南側の池において水圧式水位計により水位の連続計測をおこなっている。この池の水源は湧水であり池の水は一定の水位を超えた分が園外に流出している。また、小金井新橋観測所から約200m離れた地点で地下水位の観測を行っている。なお、平成17年度の地下水位の調査結果については平成18年年報<sup>8)</sup>に詳細が記されているので参照されたい。図-4の計算時における各タンクの貯留高 (H1~H4) の変化を図-6に示した。各タンクの貯留高は上段に位置するほど短期間の流出に対応したものとなっている。

図-7に平成17年4月4日から平成18年3月31日の期間における滄浪泉園内の池の水位と4段目タンクの貯留高H4の変化を示した。池の水位について年間の

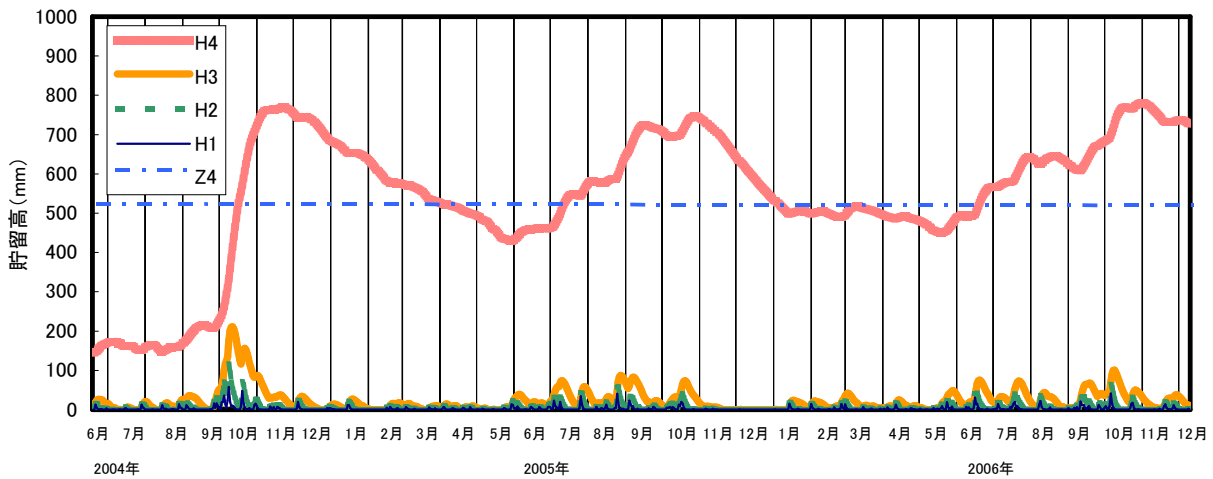


図-6 貯留高の変化

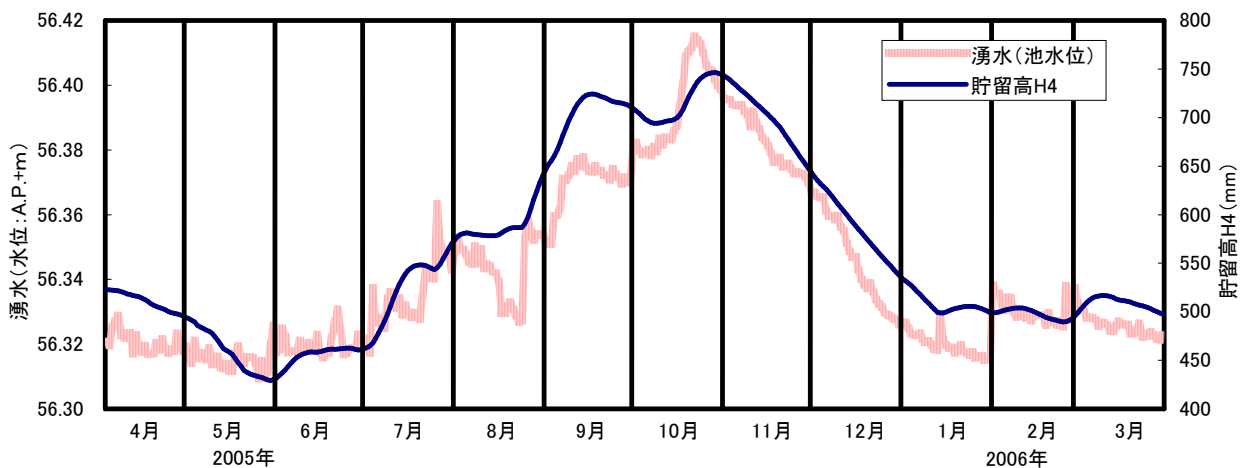


図-7 湧水と貯留高

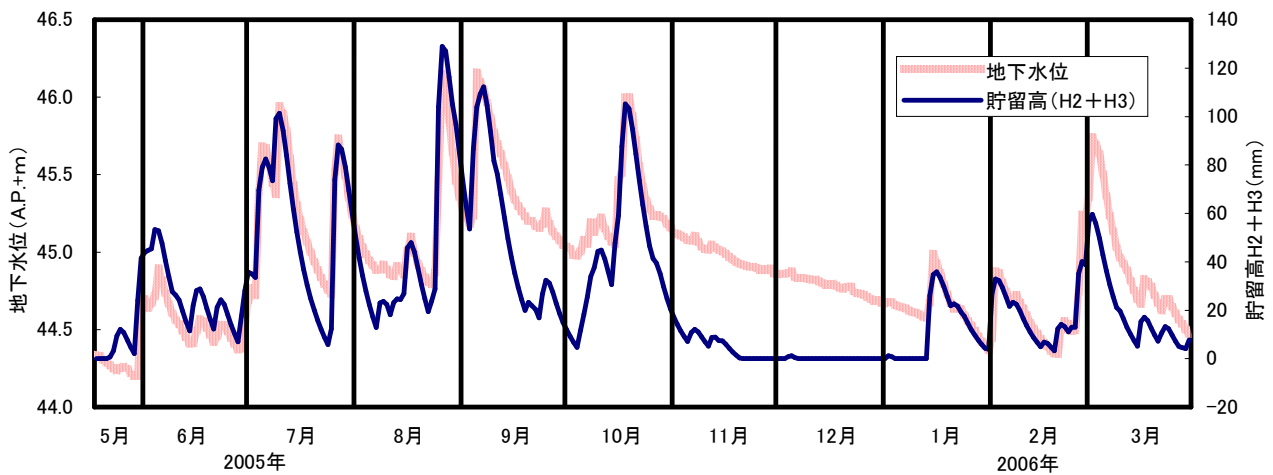


図-8 地下水位と貯留高

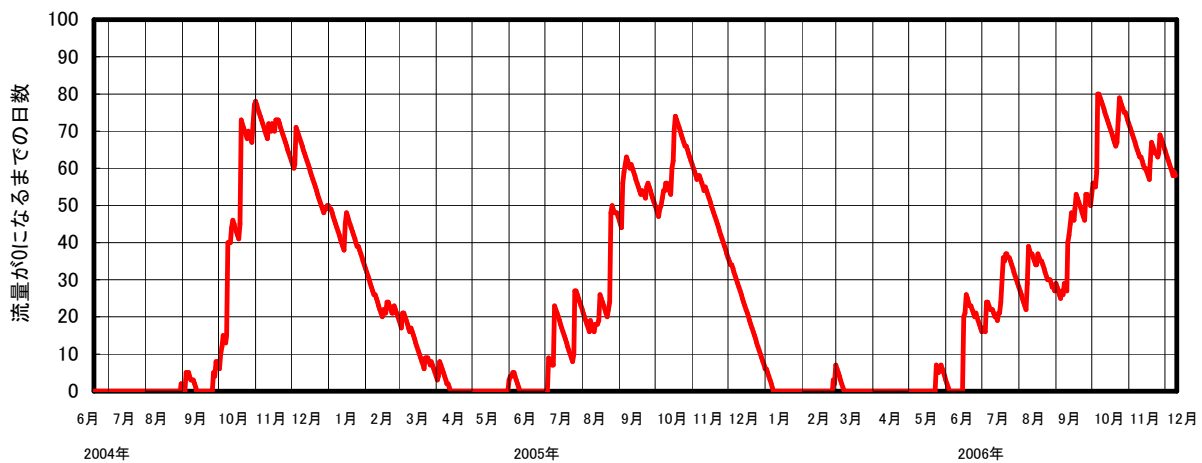


図-9 雨が降らない条件下で流量が0になるのに要する日数

変化を見ると5月末に最も低く、また10月末に最も高くなっており、4段目タンクの貯留高と概ね同様の変化をしている。

図-8に平成17年5月18日から平成18年3月30日までの地下水位と2・3段目タンクの貯留高の和 (H2+H3) の変化を示した。地下水位の年間の変化を見ると約10箇所においてピークが見られ、2・3段目タンクの貯留高の和についても同様のピークが見られる。このことから4段目タンクが湧水から河川への流出を表し、2段目と3段目タンクが地下水から河川への流出を表していると判断される。湧水や地下水位の変化と同様の変化を各タンクの貯留高が示したことから、構築したモデルと決定したモデル定数の組み合わせにより現況の流出機構が的確にモデル化されたものと判断した。

## 7. 長期流出特性

図-6における4段目のタンクの貯留高 (H4) は年間の流量変化の傾向を表している。4段目のタンクの貯留高について1年間の変化をみると、5月から10月末にかけて貯留高が増加し、11月から5月にかけて貯留高が減少している。4段目のタンクの貯留高H4が流出孔の高さZ4 (519mm) より小さくなる期間において流量が0となることから、瀬切れの発生のしやすさは4段目のタンクの貯留高に着目することで把握でき、貯留高が最小となる5月に瀬切れが発生しやすいことが推察される。

解析対象期間の毎日について、以降に雨が降らない場合に何日間で瀬切れが発生するかを推定した。計算は長期流出解析結果により得られた各タンクの日単位貯留高 (図-5) をモデルに入力し、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。図-9に計算結果を示した。流量が0になるのに要する日数と4段目のタンクの貯留高は同じような変化をしている。流量が0になるのに要する日数の最大値は、2004年が78日、2005年が74日、2006年が80日であり、各年の10月に位置している。よって11月以降に降雨が極めて少ない場合には1月に瀬切れが発生する可能性がある。

## 8. まとめ

野川上流域を対象にタンクモデルを用いた日単位長期流出モデルを構築した。約2年半の観測水文デー

タに対してSCE-UA法を用いて決定したモデル定数を用いることで構築したモデルは現況の河川流量の変化を良好に再現することを確認した。

構築したモデルによる計算結果から、①瀬切れが発生しやすい時期は5月である、②11月以降の降雨が極端に少ないと1月に瀬切れが発生することが推察された。

本報で構築したモデルにより不透水層設置前後について降雨流出特性を解析し、同一条件に対する河川流量の変化を比較することで、不透水層設置の効果を定量的に示すことが可能である。

## 参 考 文 献

- 1) 和泉清、渡辺浩章、国分邦紀(1974)：都市河川流域の水収支に関する研究(その1)、昭49. 都土木技研年報、51-61
- 2) 米田宗弘、和泉清、渡辺浩章、土屋十圀、国分邦紀(1975)：都市河川流域の水収支に関する研究(その2)、昭50. 都土木技研年報、113-124
- 3) 多田毅、横尾善之、重村利幸(2005)：タンクモデル定数の同定における安定性の導入、土木学会論文集No. 782/II-70、1-10
- 4) 藤原洋一、田中丸治哉、畑武志、多田明夫(2003)：流出モデル定数の最適同定における誤差評価関数の選択に関する研究、農業土木学会論文集No. 225、137-149
- 5) 田中丸治哉(1995)：タンクモデル定数の大域的探索、農業土木学会論文集No. 178、103-112
- 6) 近藤純正(1997)：日本の水文気象(5) ポテンシャル蒸発量と気候湿潤度、水文・水資源学会誌、450-457
- 7) 市川新(1987)：メッシュ法概念とパラメータの同定、京都大学防災研究所年報、第30号、B-2、237-248
- 8) 石原成幸、川合将文、川島眞一、高崎忠勝(2006)：野川上流域における地下水・湧水および河川環境、平18. 都土木技術センター年報、221-228