低水流出に適用する貯留関数式の定数の特性

PROPERTIES OF PARAMETERS IN STORAGE FUNCTION EQUATION USED FOR LOW FLOW

藤村和正¹・井芹慶彦²・鼎信次郎³・村上雅博⁴

Kazumasa FUJIMURA, Yoshihiko ISERI, Shinjiro KANAE and Masahiro MURAKAMI

¹正会員 博(工) 明星大学准教授 理工学部 (〒191-8506東京都日野市程久保2-1-1)

²正会員 博(工) 東京工業大学産学官連携研究員 大学院理工学研究科

(〒152-8550東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科 (〒152-8550東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴フェロー会員 工博 高知工科大学教授 環境理工学群 (〒1782-8502高知県香美市土佐山田町宮ノ口185)

This study investigated the properties of low-flow parameters in storage function equation, of which represented by relation of exponential, using the hourly hydrological model for four mountainous basins. The $A_u - N$ exponential equation includes two parameters of α and β . The hydrological analysis was performed for selected six N values in the range of 1 to 10^5 with the range of A_u value determined by trial and error. The result shows that parameter β equaled to 1, therefore the $A_u - N$ relationships were represented by inversely proportional equation. In addition, storage function equation can be expressed by only one parameter of α , which is the specific value for each basin.

Key Words : low flow, mountainous basin, storage function equation, flow duration curve, hydrological analysis

1. はじめに

社会における水資源の重要性から、無降雨が長く続くときの流出については、19世紀後半頃から研究が行われている。低水流出の減水特性については初期の研究を含めてHall¹⁾が整理している。その中で、Boussinesq²⁾は流出を時間の関数として表し、Horton³⁾は貯留量の関数として表したことを記している。その後、これらの関数式の研究が進められ、様々な形式の減水式が提案されている^{4), 5), 6)}など。本研究では、水循環プロセスにおいて低水流出を重視し、Horton³⁾により示された次に示す流出量 - 貯留量式を基礎として進める。

$$Q = K S^N \quad (1)$$

ここに、 Q : 流量, S : 貯留量, K : 定数, N : 指数。
山地流域を対象とした水循環解析において安藤ら^{7), 8)}は、Ding⁴⁾が水理学的な考察から示した次の不圧地下水流出の貯留関数式を適用している。

$$Q_g = A_u^2 S_g^2 \quad (2)$$

ここに、 Q_g : 地下水流出量, A_u : 定数, S_g : 地下水貯留

量。(2)式は(1)式の指数 N 乗を二乗とし、定数 K を A_u^2 で表した式である。近年、Ding⁹⁾は、 N 乗とした(3)式に示す貯留関数式を再び提案し、短期の流出イベントを対象にして N 値を1から3程度の値で示している。

$$Q_g = A_u^N S_g^N \quad (3)$$

Fujimura *et al.*¹⁰⁾は、安藤ら⁸⁾の水循環モデルにいくつかの改良を加え、早明浦ダム流域を対象に水循環解析を行った。その結果、概ね再現性は得られたものの、低流出部では解析値は実測値に対して差異が見られた。そこで著者ら¹¹⁾は低水流出の貯留関数式の再検討が必要であると考え、(3)式を用いて早明浦ダム流域と白川ダム流域を対象に7,900回の水循環解析を行い、 A_u と N の最適値の探索を行った。得られた結果は、解析誤差の最小値近傍に現れる $A_u - N$ 関係は指数関数で表されること、つまり、 α と β を定数とする次式で表されることである。

$$A_u = \frac{1}{\alpha N^\beta} \quad (4)$$

指数 N に着目すると、探索範囲1~40における最適値は、早明浦ダム流域では39.5、白川ダム流域では40.0となり高位の値として現れた。また、探索範囲を1~100に拡張した同様の解析¹²⁾でも、早明浦ダム流域では100.0、白川

ダム流域では70.0となり最適な N 値は高位に表れた。この理由は、Smakhtin¹³⁾が指摘しているように、低水流出は長期間に流域内で発生する様々な複雑な自然現象が集約された結果であり、非線形性が強いことが考えられる。著者らの研究から生じた課題は、指数を N 乗とする貯留関数式には新たに定数 α と β が設定され、指数 N を含めて貯留関数式の定数が3つに増えたことである。そしてこの3つの定数の特性が明らかでないことである。これは将来的な実用を考えると困難さが残る。そこで本研究では、前報¹¹⁾と同様の水循環解析による最適定数の感度分析に基づき、対象流域を2流域から4流域に増やし、指数 N の探索範囲を $1 \sim 10^5$ まで拡張し、 A_n と N の最適値探索を効率的に行い、低水流出を対象とした貯留関数式の定数の特性を示すとともに、実用に向けた貯留関数式を提案することを目的とする。

2. 対象流域

(1) 流域の概要

対象流域は、四国地方の吉野川上流の早明浦ダム流域と早明浦ダム流域内の瀬戸川流域、および東北地方の最上川上流の白川ダム流域と寒河江ダム流域の4つの山地河川流域とする。図-1には流域の概要図を示す。

早明浦ダム流域（流域面積472km²）は四国の重要な水源であり、下流の池田ダムとの連携操作によって高度な水利用が行われている。瀬戸川流域（流域面積53.7km²）は、早明浦ダム流域内の高知分水施設の一つである瀬戸川取水堰までの流域とする。高知分水は鏡川流域へ流域変更を行い、高知市に水道用水を供給している。白川ダム流域（流域面積206km²）と寒河江ダム流域（流域面積233km²）は、東北地方の最上川の上流支川の置賜白川と寒河江川の上流に位置し、河川水は主に農業用水に利用されている。この2つの流域は、冬季の大陸性季節風の影響が強い日本有数の豪雪地帯にある。

20万分の1日本シームレス地質図から各流域の表層地質を読み取り、地質年代の面積率を表-1に表した。早明浦ダム流域と瀬戸川流域は、ほぼ中生代の変成岩類が占めている。白川ダム流域は、新第三紀と古第三紀の火山性地質が卓越している。寒河江ダム流域は、中生代の深成岩類が多いが、新第三紀、第四紀地質も含まれており、白川ダム流域とは異なる複雑な地質構成となっている。

(2) 水文データ

使用する水文データは1時間単位の降水量、流出量、気温データであり、対象期間は早明浦ダム流域と瀬戸川ダム流域では、1991年1月1日から2010年12月31日までの20年間、白川ダム流域と寒河江ダム流域では、2003年10月1日から2013年9月30日までの10年間である。早明浦ダム流域の降水量、ダム流入量データおよび瀬戸川取水堰

図-1 対象流域の概要図

表-1 流域の地質年代の面積率

	第四紀	新第三紀	古第三紀	中生代	合計
早明浦ダム	1.8%	0.0%	0.5%	97.7%	100.0%
瀬戸川流域	0.9%	0.0%	0.0%	99.1%	100.0%
白川ダム	2.4%	87.2%	9.4%	1.0%	100.0%
寒河江ダム	14.4%	32.4%	2.9%	50.3%	100.0%

表-2 各観測点の年降水量と年流出量（単位:mm）

早明浦ダム流域（20年間平均値）	寺川	3,448	白川ダム流域（10年間平均値）	高峰	2,568	寒河江ダム流域（10年間平均値）	志津	3,009
	長沢	3,735		下屋地*	2,126		寒河江	2,696
	桑瀬	2,848		中津川 ^A	2,653		日暮沢*	2,442
	小北川	3,056		岳谷*	2,437		大井沢 ^A	2,727
	黒丸	3,479		東沢*	1,345		流出高	3,804
	大北	2,841		流出高	2,484		A: AMeDASデータ *: 冬期データ不良	
	早明浦	2,745		A: AMeDASデータ *: 冬期データ不良				
	流出高	2,158						

地点の高知分水への導水量データは水資源機構から提供を受けた。瀬戸川取水堰は固定堰であるため、導水量は最大で4.4m³/s（7.08mm/day）である。気温データは本山地点のAMeDASデータを用いた。白川ダム流域、寒河江ダム流域の各種データは水文・水質データベースおよびAMeDASデータから取得した。データは主管機関で照査され、信頼性を有していることを前提とした。冬期に欠測となる地点の降水データは、流域内の有効な他の地点のデータを適用した。

(a) 年降水量と年流出量

図-2 対象流域の標高-降水量の関係

各観測点の期間平均の年降水量と年流出量を表-2に示す。早明浦ダム流域の年降水量は2,841mm～3,735mm、平均値は3,165mmで年流出量2,158mmより約1,000mm大きい。前報で示した早明浦ダム流域の20年間の年水収支において¹¹⁾、年蒸発散量448mm以外の損失量が612mmであり、早明浦ダム流域は石灰質変成岩が支配的であることから、地下水貯留量の漏出が考えられる。白川ダム流域の冬期不良観測点を除いた年降水量は、高峰2,568mm、中津川2,653mmで、その平均値2,611mmは年流出量2,484mmより127mm小さい。冬季降水量の標高依存性を考慮すると流域年降水量は水収支的に妥当な値であると思われる¹¹⁾。寒河江ダム流域の年降水量は2,696mm～3,009mmの範囲で平均値は2,811mmである。これは年流出量3,804mmを約1,000mmも下回っている。この理由として、冬季降水量の正確な補足が困難なことや、古・中生層が50%以上を占め、透水層の地層の走向が流域表面の傾斜と一致しておらず、流域外からの浸入量が存在する可能性などが考えられる。

(b) 季節別の標高と降水量の関係

各流域の標高 - 降水量関係を冬期と夏期に分けて図-2に表した。降水量は期間平均の日降水量 (mm/day) である。なお、白川ダム流域と寒河江ダム流域には、標高の低い地点として流域外のAMeDAS長井の降水量を含めている。標高 - 降水量関係を直線近似したところ概ね正の相関が見られた。特に積雪域である流域は、冬期の近似直線の傾きが大きい。各流域の標高 - 降水量直線の傾きは水循環解析で流域降水量の算定に用いている。

(c) 流況曲線

4流域の実測の流況曲線を図-3に示す。横軸は対象期間全日数を百分率で表した経過日数割合 (%) である。表-3には15%流量、97%流量とその平均値を示す。15%流量を見ると寒河江ダム流域の値が特に大きい。

3. 方法

(1) 水循環モデル

本研究で用いる水循環モデルは、前報¹¹⁾で紹介した山地河川流域に適用してきた水循環モデルである。その構造は、流域平均降水量の推定、Diskin-Nazimovモデルによる直接流出量と雨水浸透量の算定、安藤ら⁷⁾の手法に

図-3 各流域の流況曲線

表-3 経過日数割合の流出高と平均値(単位:mm/day)

流域名	対象期間 (年数, 日数)	QH _{15%}	QH _{97%}	QH _{ave.} (15%-97%)
早明浦ダム	1991.1.1-2010.12.31 (20年間, 7,305日)	6.5962	0.6771	2.526
瀬戸川		6.39	0.77	2.778
白川ダム	2003.10.1-2013.9.30 (10年間, 3,653日)	12.12	0.99	4.139
寒河江ダム		20.054	2.013	6.970

よる不飽和帯水分量、地下水涵養量と地下水流出量の算定、貯留関数法を用いた洪水流出量の算定からなり、地下水流出量と洪水流出量の和が総流出量となる。詳細な説明は本稿では省略する。

(2) 誤差評価式

解析誤差の評価方法として、当初、以下に示す日流出量相対誤差の平均値 (ADRE: Average of Daily runoff Relative Error) (%) と Nash指標 (E) を考えた。

$$ADRE = \frac{\sum \left(\frac{|Q_{cal} - Q_{obs}|}{Q_{obs}} \times 100 \right)}{n} \quad (\%) \quad (5)$$

$$E = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_m)^2} \quad (6)$$

ここに、 Q_{cal} : 日流出量計算値、 Q_{obs} : 日流出量実測値、 Q_m : 流出量実測値の評価期間平均値、 n : 評価日数合計。表-4に示す A_u と N を用いて早明浦ダム流域を対象に水循環解析を行ったところ、Nash指標は、洪水流出を含む場合 (①と③) では0.9以上となるが、低水流出 (②と④) に対してはマイナス値となった。一方、ADREは、洪水流出を含む場合も低水流出を対象にした場合も数値に大きな差異は生じていない。Nash指標は式の構造が実測平均値 Q_m を分母としているため、洪水から低水まで変動幅が大きい現象と、低水流出の変動幅の小さい現象では、

感度が異なると考えられる。本研究では、低水流出に対して分かりやすい評価値は $ADRE$ であると見なし、誤差評価関数として採用する。評価対象期間は、全ての流域で安定した流況が得られていることを勘案し、実測値の経過日数割合15%以上97%未満の流量とした。

(3) 最適定数の探索

効率的な方法で最適値の探索を行う。つまり、 N 値を1, 2, 10, 100, 10^3 , 10^4 , 10^5 に固定し、この N 値に対して試算によって A_u 最適値が含まれる範囲を設定する。そして固定した N 値に対して A_u 値を変化させて水循環解析を繰り返し、最適な A_u - N 値の組み合わせを探索する。

4. 結果と考察

(1) 最適定数の探索結果

選定した指数 N に対する定数 A_u の探索範囲、計算数、 A_u 最適値および解析誤差 $ADRE$ を早明浦ダム流域を例に表-5に示す。前報¹¹⁾では、水循環解析の計算数は合計7,900計算であった。しかし、本研究では、 N 値の探索範囲1~ 10^5 の中で計算対象の N 値を6つ選定し、 A_u の探索範囲を限定したため、計算数は合計295であった。 N 値の探索範囲を拡張させる一方で計算数を大幅に減らすことができた。図-4に A_u の探索範囲に対する $ADRE$ の変化曲線とその最小値を表す。各 N 値に対して $ADRE$ は下に凸の曲線となり、 $ADRE$ が極小になる点が A_u の最適値である。他の3流域についても同様の手法で最適定数を探索した(表-6)。次に、早明浦ダム流域を例として、最小の $ADRE$ を得た A_u - N 関係を図-5の両対数グラフに表す。 A_u - N 関係は、両対数グラフ上で N 値が100以上の場合完全相関であり、 A_u - N の最適値は近似直線上に存在する。しかし、 $N=10$ ($1E+01$) の A_u - N 最適値は近似直線と若干のズレが見られた。従って、他の3流域についても N 値100以上の範囲において最小二乗近似を行った。その結果、(4)式と同形の指数関数式を4流域において得た。表-7には(4)式の定数 α 、 β および相関係数 R^2 を示す。これらの結果から、最小誤差を得る A_u - N 関係は、(4)式と同様の指数関数式で表されることが追認できた。この理由として、貯留関数式 $Q_g = A_u^N S_g^N$ において N 値の増加に対して A_u 値が指数関数的に減少しないと A_u^N が非常に大きな値となり、計算値 Q_g が発散することになる。それ故 A_u - N 関係は指数関数式が成立すると考えられる。

(2) 実用的な低水流出の貯留関数式

(4)式における定数 β の値は、表-7に示すように、瀬戸川流域と寒河江ダム流域では1であり、他の2流域では1.004と1.005である。この結果から β は1である可能性が高く、そして β は流域に依存しないことが考えられる。従って、 $\beta=1$ と見なすと α を唯一の定数とした指数 N に対

表-4 早明浦ダム流域での $ADRE$ とNash指数の比較

A_u 値, N 値	評価範囲	$ADRE(\%)$	Nash指数
$N=2$ $A_u=0.031$	① QH (0% ~ 97%)	39.145	0.918
	② QH (15% ~ 97%)	38.625	-0.346
$N=100$ $A_u=0.00031$	③ QH (0% ~ 97%)	33.871	0.929
	④ QH (15% ~ 97%)	32.214	-0.00372

表-5 早明浦ダム流域の N 値に対する A_u 最適値の探索

N	A_u 探索範囲	ステップ値	計算数	A_u 最適値	$ADRE(\%)$
1	0.06 ~ 0.30	0.01	25	0.12	48.971
2	0.015 ~ 0.064	0.001	50	0.031	38.625
10	0.0020 ~ 0.0060	0.0001	41	0.0034	32.294
100	0.00016 ~ 0.00064	0.00001	49	0.00031	31.214
10^3	$1.6 \times 10^{-5} \sim 5.5 \times 10^{-5}$	1.0×10^{-6}	40	3.0×10^{-5}	31.108
10^4	$1.6 \times 10^{-6} \sim 6.5 \times 10^{-6}$	1.0×10^{-7}	50	3.0×10^{-6}	31.098
10^5	$1.6 \times 10^{-7} \sim 5.5 \times 10^{-7}$	1.0×10^{-8}	40	3.0×10^{-7}	31.097

表-6 その他流域の N 値に対する A_u 最適値

N	瀬戸川流域		白川ダム流域		寒河江ダム流域	
	A_u	$ADRE(\%)$	A_u	$ADRE(\%)$	A_u	$ADRE(\%)$
1	0.055	78.586	0.084	42.022	0.056	31.636
2	0.014	74.293	0.022	38.976	0.012	30.199
10	0.0016	72.101	0.0027	37.004	0.0013	28.915
100	0.00014	71.828	0.00025	36.601	0.00012	28.624
10^3	1.4×10^{-5}	71.798	2.4×10^{-5}	36.559	1.2×10^{-5}	28.607
10^4	1.4×10^{-6}	71.7954	2.4×10^{-6}	36.5546	1.2×10^{-6}	28.6055
10^5	1.4×10^{-7}	71.7951	2.4×10^{-7}	36.5542	1.2×10^{-7}	28.6053

図-4 最適定数の探索の一例(早明浦ダム流域)

する A_u の次に示す反比例式が得られる。

$$A_u = \frac{1}{\alpha N} \quad (7)$$

(7)式を(3)式に代入し変形すると次式となる。

$$Q_g = \left(\frac{S_g}{\alpha N} \right)^N \quad (8)$$

これらは N 値が100から 10^5 の範囲で近似して得られた式であるので、式の適用範囲も同様の100から 10^5 である。

表-5および表-6から N 値が100と 10^5 のときの $ADRE$ を比較すると、 10^5 の方が $ADRE$ は僅かに小さく精度は良いが、

図-5 最適 A_u - N 関係の一例

表-7 対象流域の定数 α と β の値と相関係数 R^2

	早明浦ダム	瀬戸川流域	白川ダム	寒河江ダム
α	31.9	71.4	39.5	83.3
β	1.004	1	1.005	1
R^2	1	1	1	1

実質的には N 値は100も 10^5 も同程度の解析精度である。そこで、分かりやすい指標として $N=100$ を採用すると、実用可能性のある次式が提案できる。

$$Q_g = \left(\frac{S_g}{100 \alpha} \right)^{100} \quad (9)$$

ここで(9)式について考察を行う。まず、 N 値に着目すると、(9)式は N 値が100で高位の値であり、流出量 Q_g は貯留量 S_g に対して非常に感度の高い式である。しかし、適切な α 値を用い、連続した貯留量 S_g が得られていれば、流出量の計算値 Q_g は発散しないことが水循環解析の結果から推察される。結果的には最適定数 α の値によって妥当な Q_g が算出されているが、 S_g の変化量と α 値との関係は重要であり、今後の検討が必要である。次に、 α 値に着目すると、 $\beta=1$ と見なしたことにより定数 α は貯留関数式で減水性を表す唯一の定数となった。本研究で得られた各流域の α 値を表-7に示す。早明浦ダム流域と瀬戸川流域の値は、それぞれ31.9と71.4である。瀬戸川流域は早明浦ダム流域内にあり、気候、地質はほぼ同じであるが α 値は異なる。また、白川ダム流域と寒河江ダム流域の値は、それぞれ39.5と83.3である。両流域とも同じ気候区の積雪域にあるが α 値が異なる。低水流出の規定要因として地質の有意性を虫明ら¹⁴⁾は述べており、高橋ら¹⁵⁾、安藤ら¹⁶⁾、横尾ら¹⁷⁾も低水流出の影響要因として地質に言及している。しかし本研究の結果からは、定数 α に影響する要因を特定することはできなかった。 α 値には、地質、気候、あるいはモデル内の他の定数との干渉など、様々な要因が影響しているものと思われる。

(3) 流況曲線の実測値と解析値の比較

解析結果の一例として早明浦ダム流域について地下水流出量計算値とハイドログラフの実測値と計算値を図-6に示す。地下水流出量は総流出量と比較して小さいハイドログラフであるが、強い降雨に対して敏感に反応して

図-6 解析ハイドログラフの一例(早明浦ダム流域)

いることが分かる。流況曲線の実測値と解析値の比較を図-7に示す。解析値は水循環解析を行い、従来型の指数 $N=2$ とした貯留関数式(2)式で得られた流況曲線と、指数 $N=100$ として提案した(9)式の貯留関数式で得られた流況曲線である。なお、 A_u 値はそれぞれの N 値に対する最適値を用いている。また、最低流量付近の実測値の急激な低下は、データ欠測等の理由による。流況曲線の解析値と実測値との比較では、使用した N 値や流域の違いによって特徴が異なる。しかし、4流域で共通しているのは、経過日数割合がおおよそ90%以上の部分で N 値が2よりも100の方が適合性がよい。個々の流域で見ると、早明浦ダム流域の場合は、 $N=100$ の方が $N=2$ より全体的に解析値は実測値に適合している。瀬戸川流域では、経過日数10%程度までは固定堰による導水量であるため、流出高は7.08mm/dayであり流況は一定となっている。寒河江ダム流域の流況曲線は、経過日数の最初から50%程度まで、解析値は実測値に対してズレが生じている。これは先にも述べたように、表-2に示す10年間の年水収支において、年流出量が年降水量を上回る現状から、流域外から浸入量の存在の可能性が要因として考えられる。

5. まとめ

前報¹¹⁾では、低水流出の貯留関数式 $Q_g = A_u^N S_g^N$ における定数 A_u と指数 N の最適値は、 A_u - N の指数関数上に現れることを述べた。本研究ではその指数関数に含まれる2つの定数 α と β の特性について検討した。地質、気候の異なる4流域において、 N 値を1から 10^5 の範囲で6つの値を選択し、試算によって定めた範囲で A_u を変化させながら水循環解析を行い、日流出量相対誤差の平均値ADREが最小値になる A_u を探索した。探索範囲を拡大させ、水循環解析の計算数を減らすことができた。解析結果は前報と同様に、 A_u - N 関係は指数関数式で表された。そして、指数関数式に含まれる β 値を1と見なすことで、 A_u は N の反比例式として表現できた。さらに指数 N について解析精度上問題ない指標値として100を設定し、実用可能性のある貯留関数式を提案した。本研究では貯留関数式の定数の感度分析を行い、最適定数の特徴を示した。水理学的考察など理論的裏付けは今後の課題とする。

図-7 流況曲線の実測値と解析値

謝辞：本研究は、独立行政法人水資源機構吉野川局、池田総合管理所から早明浦ダム流域の水文データを提供して頂いた。また、文部科学省気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)の研究課題「流域圏にダウンスケーリングした気候変動シナリオと高知県の適応策」の成果の一部である。関係各位にここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Hall, F. R.: Base flow recessions - a review. *Water Resour. Res.*, 4 (5), pp.973-983, 1968.
- 2) Boussinesq, J.: Essai sur la théorie des eaux courantes. *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences de l'Institut de France*, Tome XXIII, No. 1, pp.1-660, 1877. (Cite by Hall (1968).)
- 3) Horton, R. E.: Natural stream channel-storage. *Transactions, American Geophysical Union*, 17(2), pp.406-415, 1936.
- 4) Ding, J. Y.: Discussion of "Inflow hydrographs from large unconfined aquifers" by Ibrahim, H. A. and Brutsaert, W., *J. Irrig. Drain. Div.*, ASCE, 92, pp. 104-107, 1966.
- 5) Wittenberg, H.: Nonlinear analysis of low flow recession curves, *FRIEND: Flow Regimes from International and Experimental and Network Data*, IAHS Publ., 221, pp.61-67, 1994.
- 6) Tallaksen, L. M.: A review of baseflow recession analysis, *J. Hydrology*, 165, pp.349-370, 1995.
- 7) 安藤義久・高橋裕：山地河川の長期流出解析に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第318号, pp.93-105, 1982.
- 8) 安藤義久・知久岳史・安池宏之：山地流域の積雪・融雪モデルを含む日単位の長期流出解析, 水文・水資源学会誌, 第1巻1号, pp.69-74, 1988.
- 9) Ding, J.Y.: A measure of watershed nonlinearity: interpreting a variable instantaneous unit hydrograph model on two vastly

different sized watersheds, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, pp.405-423, doi:10.5194/hess-15-405-2011, 2011.

- 10) Fujimura, K., Shiraha, K., Kanae, S. and Murakami, M.: Development of the hourly hydrological model for mountainous basins using the storage function method and the Diskin - Nazimov infiltration model, In: *Models - Repositories of Knowledge*, IAHS Publ., 355, pp.338-344, 2012.
- 11) 藤村和正・井芹慶彦・鼎信次郎・村上雅博：水循環解析に基づく低水流の貯留関数式における最適定数に関する研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_361-I_366, 2014.
- 12) Fujimura, Y., Iseri, K., Kanae, S. and Murakami, M.: Identification of low-flow parameters using hydrological model in selected mountainous basins in Japan, In: *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water-Society Interactions*, IAHS Publ., 364, pp.51-56, 2014.
- 13) Smakhtin, V.U.: Low flow hydrology: a review, *J. Hydrology*, 240, pp.147-186, 2001.
- 14) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久：日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質の効果, 土木学会論文報告集, 第309号, pp.51-62, 1981.
- 15) 高橋裕・安藤義久・伊藤孝・伊藤和央：山地河川の低水流の減水特性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第337号, pp.75-82, 1983.
- 16) 安藤義久・高橋裕・伊藤和央：低水流の分数関数減水式の地質・季節要因による総合化, 土木学会論文集, 第357号, pp.149-157, 1985.
- 17) 横尾善之・沖大幹：山地河川の流況曲線形状を説明するための表層地質の分類法に関する検討, 水工学論文集, 第53巻, pp.463-468, 2009.

(2014. 9. 30受付)