

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：32685

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06241

研究課題名(和文)山地流域を対象にした新知見に基づく信頼性ある水循環モデルの構築と将来流出予測

研究課題名(英文)Development of the reliable hydrological model for mountainous basin based on the latest knowledge and future runoff prediction

研究代表者

藤村 和正 (Fujimura, Kazumasa)

明星大学・理工学部・教授

研究者番号：70229037

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：利水と治水の要衝となる山地流域を対象として、多くの流出解析モデルの基礎式に使用されている貯留関数式について、パラメータ特性を明確にすることにより、信頼性ある水循環モデルの構築を進めた。気候と地質条件の異なる複数の山地流域において解析を行い、1)低水流出に適用する貯留関数式の2つのパラメータは逆数の関係にあること、2)洪水流出に適用する貯留関数式の2つのパラメータは指数関数式で表現できること、を明らかにした。そして、実務で利用しやすいパラメータ値についても検討した。さらに、GCM出力値を用いた水循環解析を行い、2080年から2099年の将来流出を月単位および年水収支量として流域単位で表した。

研究成果の概要(英文)：Mountainous basins are the strategic area of both water resources and flood control in Japan. Therefore, the accurate reproduction and reliable prediction of runoff from mountainous basins are significant issue. In order to develop reliable hydrological model, this study investigate the property of the parameters in the storage-discharge relationship for low flows and floods. In addition, the hydrological analysis are carry out to estimate the runoff variation in the future using GCM data. The results show that, a) the two parameters for low flow have inverse relationship, b) the two parameters for floods have the relationship which is represented by exponential function. c) This study also examined the parameters which can be more convincingly used in practical applications. Furthermore the runoff of monthly mean and annual mean from 2080 to 2099 was estimated using climate projections of GCM and the hydrological model of this study.

研究分野：水文学、河川工学

キーワード：水循環モデル 貯留関数式 最適パラメータ 山地流域 将来流出予測

### 1. 研究開始当初の背景

日本の国土面積の約7割を占める山地部への降水は、人口・産業が集中する平地部に流出する。山地流域の降雨流出過程を表し、高い精度で流出量を算定することは水資源の管理および洪水防御にとって極めて重要である。流出現象は一般的に低水流出と洪水流出に分けられ、それらの算定には貯留関数式が国内外で広く使用されている。しかし、流域毎にまた個々の出水によって式に含まれるパラメータ値が変化し、その解釈が確立されていない。そこで本研究では、パラメータ特性を明確して信頼性ある水循環モデルを構築することを考えた。

貯留関数式のパラメータのうち指数については、Ding (1968) が水理学的考察に基づき2乗を示している。この2乗値を安藤・高橋 (1980) は、日単位の水循環モデルに取り入れ、そして、Fujimura ら (2012) は水循環モデルを1時間単位の計算刻みに改良し、その中で採用し、山地流域の水循環解析で概ね良好な再現性を得ている。しかし、ハイドログラフの低流部で解析値と実測値に差異が生じていた。Ding (2011) の近年の研究では、指数値は2乗に限定せずN乗とし一般化させた。このように低水流出のパラメータについて定まった解釈はない。洪水流出の貯留関数式についても同様であり、木村 (1961) が貯留関数法を提案して以来、パラメータに関する知見が蓄積されてはいるが、パラメータの特性解明までには至っていない。このような状況のため、筆者らは低水流出について最適パラメータの感度分析を行った。その結果、2つのパラメータ、指数Nと係数Auには相互関係があり指数関数式で表現できることを示唆した。高精度の流出量算定のためには、このパラメータ特性についてさらに探究する必要性が研究の背景にあった。

### 2. 研究の目的

わが国の利水と治水の要衝といえる山地流域において、流出量をより高い精度で算定し、信頼性ある水循環モデルの構築することを本研究の目的とした。さらに、山地流域の規模で地球温暖化による流出への影響を予測することも目的とした。具体的には、地質と気候の条件が異なる流域に対して、1) 低水流出に適用する貯留関数式のパラメータ特性を明確化すること、2) 洪水流出に適用する貯留関数式のパラメータ特性を把握すること、そして、3) GCM出力値を対象流域にダウンスケーリングし、貯留関数式の最適パラメータを用いて将来流出予測を行うこととした。

### 3. 研究の方法

対象流域は、四国地方では早明浦ダム流域と鏡ダム流域、東北地方では最上川上流の白川ダム流域と寒河江ダム流域、そして、北海道地方では、石狩川上流の大雪山ダム流域と天

塩川上流の岩尾内ダム流域とした。流域の地質と気候は流出を支配する主な要因とされており、それぞれの対象流域の地質と気候の条件は異なっている。早明浦ダム流域と鏡川流域は太平洋側気候であり、年間降水量の大半は夏期にある。白川ダム流域と寒河江ダム流域は日本海側気候であり、夏期に晴天が多く降水量は比較的少ない。そして、大雪山ダム流域と岩尾内ダム流域はオホーツク海気候であり、梅雨期がなく台風の襲来が少ない。表層地質に関しては、四国地方の2流域は地質年代が比較的古い中生層が主であり、東北地方、北海道地方の流域では、火山性地質の第三紀層、第四紀層の割合が多い。

水循環モデルの概要は、流域雨量を逆距離加重法により求め、雨水を Diskin-Nazimov の浸透モデルを用いて地下浸透成分と直接流出成分に分離する。地下浸透成分を基に地下水涵養量、地下水貯留量を求め、貯留関数式により地下水流出(低水流出)量を算出する。直接流出成分は貯留関数式に入力し遅滞時間を考慮して直接流出量を算定する。地下水流出量と直接流出量の合計を総流出量とする。洪水流出解析の方法は、上記モデルの直接流出量算定までのプロセスを用いる。なお、高度雨量直線を求めて降水の標高依存性を考慮している。また、冬期に降水量を捕捉できない積雪域の流域では、解析値の流況曲線の形状が実測値に近似するように試算により高度雨量直線の傾きを設定する。蒸発散量は Hamon 式により算定し地下水涵養量から減じる。

貯留関数式を用いる解析では、その精度は貯留関数式のパラメータに依拠するところが大きく、最適なパラメータを使用することが重要である。本研究では、洪水流出に適用する貯留関数式のパラメータ、指数p値と係数k値を変化させて1万~2万回の多数の繰り返し計算を行い、各p-k値に対する誤差評価値を表す。そして、全ての対象洪水の誤差評価値を重ね合わせて平均化し、流域代表値を表す。低水流出に適用する貯留関数式のパラメータ、減水定数Auと指数Nの最適値についてもAu-N値を変化させる多数の繰り返し計算により求めるが、繰り返し計算を簡素化した藤村ら (2015) が示した実用的な手法を用いる。

将来流出予測の方法として、GCM出力値はMIROC5の昇温が最も大きいRCP8.5シナリオデータを採用し、対象流域を囲む矩形領域を0.5度で分割した格子点の日単位の降水量と気温を用いる。図1には早明浦ダム流域の場合を例示する。対象流域へのダウンスケーリングは、矩形領域を1kmグリッドに分割し、逆距離加重法により流域内を500mに分割したグリッド点の降水量と気温を求め、それらを平均化してGCM値の流域降水量と気温を求める。そして、GCM値のバイアス補正は、将来期間(2080-2099年)と現在期間(例えば早明浦ダム流域の場合は

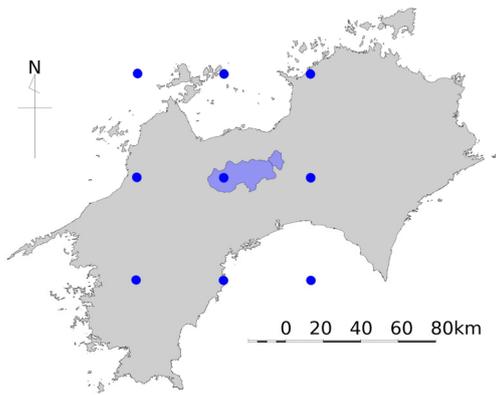


図1 0.5度分割したGCM出力点と流域の位置関係 (早明浦ダム流域の例)

1986-2005年)の月単位の値を比較し、降水量については変化量、気温については変化率を求め、観測値に反映させる方法とする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 洪水流出に適用する貯留関数パラメータの最適値

貯留関数式の指数  $p$  と係数  $k$  には相互関係があり、指数関数の  $p$ - $k$  曲線として表現できることを全ての対象流域において確認できた。図2には早明浦ダム流域を例として、1991年から2015年の44洪水に対する洪水流出解析から得た最適パラメータ  $p$ - $k$  値とその近似曲線を示す。最適パラメータは洪水毎に異なるが、長期水循環解析を行う際には流域唯一の値が必要である。また、将来流出予測を行う場合にも、まだ発生していない洪水に対して有効なパラメータを設定する必要がある。

そこで、洪水流出解析の誤差評価値を Nash 指数とし、 $p$ - $k$  値を広範囲に設定し、その範囲内で  $p$ - $k$  値を変化させて洪水流出解析を繰り返し、その結果から得た Nash 指数を可視化する。そして、Nash 指数値の最大値の位置の  $p$ - $k$  値を対象洪水の最適パラメータ値と見なす。早明浦ダム流域の対象期間の最大規模の洪水 (2005年9月5日洪水) を例として、解析により得た Nash 指数値を可視化して図3(a)に表す。次に、全ての対象洪水の同じ  $p$ - $k$  値に対する Nash 指数値を重ね合わせて平均化し、その最大値を得る  $p$ - $k$  値を流域を代表するパラメータとして特定する。つまり、可視化した個々の洪水の Nash 指数グラフを重ね合わせて平均化する手法である。図3(b)は、早明浦ダム流域の44洪水の解析から得た Nash 指数を可視化したグラフである。この手法を他の対象流域にも適用し、貯留関数パラメータの流域代表の  $p$ - $k$  値を得ることができた (表1)。

##### (2) 低水流出に適用する貯留関数パラメータの最適値

低水流出の2つのパラメータ、指数  $N$  と減水定数  $Au$  は逆数で表現できることを藤村ら (2015) は示唆していたが、本研究の対象流域でも確認することができた (図4(a)に大雪ダム流域の場合を示す)。そして、 $N$  値は実

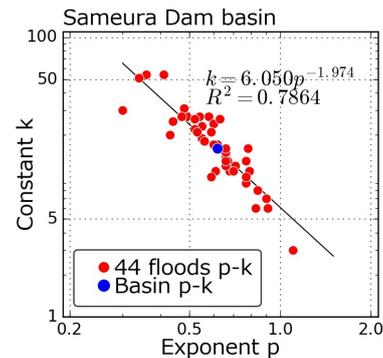


図2 早明浦ダム流域における33洪水の洪水流出解析から得た  $p$ - $k$  最適値と近似曲線

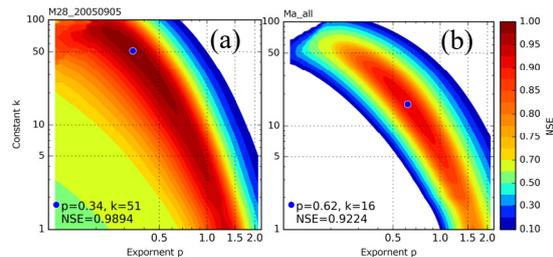


図3 パラメータ  $p$ - $k$  値を変化させた洪水流出解析の結果から得た誤差評価値 Nash 指数の可視化 (早明浦ダム流域の例) (a)2005年9月5日洪水の結果。●印は Nash 指数最大値の位置 ( $p=0.34, k=51$ ) (b)44個の対象洪水の平均 Nash 指数可視化グラフ。●印は Nash 指数最大値の位置 ( $p=0.62, k=16$ )。

表1 洪水流出の貯留関数パラメータ流域代表値

対象流域	洪水数	$p$	$k$	Nash 指数
早明浦ダム	44	0.62	16	0.9224
鏡ダム	6	0.58	18	0.9175
白川ダム	13	0.74	10	0.8047
寒河江ダム	17	0.80	7	0.8949
大雪ダム	10	0.77	10	0.8323
岩尾内ダム	9	1.17	17	0.8592

用的な値として100を用い、減水定数  $Au$  の最適値を繰り返し計算により日流出量相対誤差の平均値 (ADRE) が最小となる値を求めた (図4(b))。ADRE は実測値の流況曲線の経過日数割合が15%以上97%未満の流量を評価した。なお、解析値の流況曲線が実測値の流況曲線の形状と乖離する場合は、冬期の観測降水量を補正し、解析値の流況曲線を実測値の流況曲線に近似させた。長期水循環解

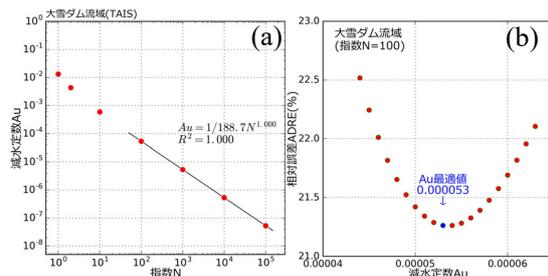


図4 低水流出のパラメータ (a) $N$ - $Au$  関係と (b)減水定数  $Au$  の最適値探索 (大雪ダム流域の例)

表2 低水流出の貯留関数パラメータの最適値

対象流域	解析年数	Au	ADRE(%)
早明浦ダム	1986-2015	$2.7 \times 10^{-4}$	27.8
白川ダム	2003-2017	$1.5 \times 10^{-4}$	30.3
寒河江ダム	2002-2017	$7.2 \times 10^{-5}$	26.0
大雪ダム	2002-2017	$5.3 \times 10^{-5}$	21.3
岩尾内ダム	2002-2017	$2.3 \times 10^{-4}$	30.9

析の結果を表2に示す。相対誤差ADREは約20%~30%であり、概ね良好な結果を得ることができた。以上より、洪水流出および低水流出に適用する貯留関数パラメータについて、その特性を表し、妥当性を示すことができたと考えている。

### (3) 将来流出予測

前述の水循環モデルに貯留関数式の最適パラメータを適用し、対象流域にダウンスケールしたMIROC5のRCP8.5のGCM値を用い、2080年から2099年を対象とした水循環解析を行った。そして、月単位と年水収支量として整理し、現在値と比較した。図5には月単位の総流出量の将来変化を表す。早明浦ダム流域では、6月に流出量が増大する結果になった。他の積雪域4流域では、融雪が早期化しているのが特徴といえる。なお、鏡ダム流域については、早明浦ダム流域に隣接した流域であるため、早明浦ダム流域の解析結果を参考値とする。年水収支量の変化については、いずれの流域でも将来の降水量は現在に比べて約10~20%程度増加した。積雪域では、降水量に占める降雪量の割合は現在の45%程度から将来は30%~15%程度に減少し、降雨量は現在の55%程度から将来は70%~85%程度に増加しており、気温上昇の影響が降雪量の減少に表れている。流出量について、直接流出量は流域によって増減はあるが、大きな変化はない。地下水流出量はいずれの流域でも増加している。そしてハモン式で算定した蒸発散量は各流域で150~170mm程度

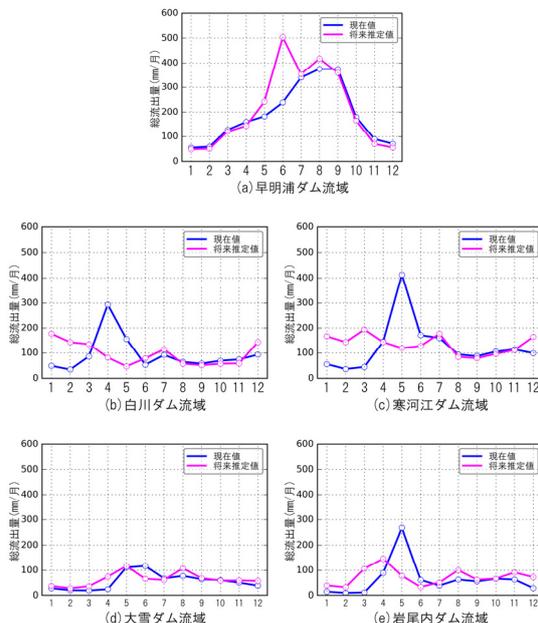


図5 対象流域の将来の総流出量の月変化

増加している。

山地河川流域を対象として、洪水流出および低水流出の貯留関数パラメータの特性を多数の繰り返し解析により表すことができた。そして、現段階で最適と見なせるパラメータ値を特定し、Diskin-Nazimovの雨水浸透モデルと貯留関数式を基本構造とした水循環モデルに反映させた。さらに、GCM出力値を利用して水循環解析を行い、日本の山地のダム流域規模で将来流出の変化を表すことができた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① 藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、Thomas Kjeldsen、村上雅博、貯留関数パラメータの一般性に関する気候・地質条件の異なるダム流域における検討、河川技術論文集、土木学会、査読有、Vol.23、2017、pp.161-166.

② 藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、洪水流出を対象とした貯留関数パラメータの不確実性低減に向けた解析的研究、土木学会論文集 G (環境)、査読有、72(5)、2016、I\_35-I\_43.  
[https://doi.org/10.2208/jscejer.72.I\\_35](https://doi.org/10.2208/jscejer.72.I_35)

[学会発表] (計16件)

① 藤村和正、井芹慶彦、鼎信次郎、岡田将治、村上雅博、積雪山地流域における将来の年水収支量の推定、水文・水資源学会 2018年研究発表会、2018.

② 藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、積雪地域のダム流域における長期水循環解析と年水収支量の検討、土木学会第73回年次学術講演会、2018.

③ K. Fujimura, Y. Iseri, S. Kanae, S. Okada and M. Murakami, Identifying runoff parameters and predicting future runoff with GCM data in a mountainous basin in Japan, 32nd Conference on Hydrology, 98th American Meteorological Society, 2018.

④ 藤村和正、井芹慶彦、鼎信次郎、岡田将治、村上雅博、貯留関数パラメータの流域代表値の特定とその適用に関する一考察、水文・水資源学会 2017年研究発表会、2017.

⑤ 藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、貯留関数式のパラメータ特性に関する4つのダム流域における考察、土木学会第72回年次学術講演会、2017.

- ⑥藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、早明浦ダム流域を対象にした長期流出解析における洪水流出の再現性および将来流出予測、第 25 回地球環境シンポジウム、土木学会、2017.
- ⑦ Kazumasa Fujimura, Yoshihiko Iseri, Thomas Kjeldsen, Shoji Okada, Shinjiro Kanae, and Masahiro Murakami, Formulation of parameters in the storage-discharge relation for floods in three mountainous basins in Japan, EGU General Assembly 2017, 2017.
- ⑧仲田光喜、藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、岩尾内ダム流域における貯留関数パラメータの一般化に関する検討、第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会、2017.
- ⑨増田翔吾、藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、早明浦ダム流域における将来流出の月平均値と年水収支量に関する考察、第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会、2017.
- ⑩藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、貯留関数式のパラメータ特性に関する早明浦ダム流域における考察、水文・水資源学会 2016 年研究発表会、2016.
- ⑪藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、良好な再現性を得る貯留関数式のパラメータの範囲について、土木学会第 71 回年次学術講演会、2016.
- ⑫ K. Fujimura, Y. Iseri, S. Kanae, S. Okada and M. Murakami, Identification of parameters in the storage-discharge relationship for floods: A case study in the sameura dam basin, Japan, The role of hydrology towards water resources sustainability, XXIX Nordic Hydrological Conference, 2016.
- ⑬藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、鼎信次郎、村上雅博、貯留関数式の最適パラメータから評価する直接流出の分離について、第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会、2016.
- ⑭鈴木勝好、藤村和正、井芹慶彦、岡田将治、貯留関数式のパラメータ特性に関する鏡川流域における考察、第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会、2016.
- ⑮藤村和正、井芹慶彦、鼎信次郎、村上雅博、洪水流出を対象とした貯留関数式のパラメータの不確実性低減に関する早明浦ダム流域における検討、第 5 回流域圏学会学術研究発表会、2015.

- ⑯藤村和正、井芹慶彦、鼎信次郎、村上雅博、多数の出水を対象とする貯留関数式の最適定数に関する一考察、土木学会第 70 回年次学術講演会、2015.

〔図書〕 (計 0 件)  
無し。

〔産業財産権〕  
無し。

○出願状況 (計 0 件)  
無し。

○取得状況 (計 0 件)  
無し。

〔その他〕  
ホームページ等  
無し。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤村和正 (FUJIMURA, Kazumasa)  
明星大学・理工学部・教授  
研究者番号：70229037

### (2) 研究分担者

鼎 信次郎 (KANAE, Shinjiro)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・教授  
研究者番号：20313108

### (3) 連携研究者

岡田 将治 (Okada, Shoji)  
高知工業高等専門学校・環境都市デザイン  
工学科・准教授  
研究者番号：80346519

村上 雅博 (Murakami, Masahiro)  
高知工科大学・名誉教授  
研究者番号：30299391

### (4) 研究協力者

無し。