# 気候変化によるタイ国パサック川流域の 水資源変化の予測

WATER RESOURCES PROJECTION AT THE PASAK RIVER BASIN IN THAILAND UNDER A CHANGING CLIMATE

立川 康人<sup>1</sup>・藤田 勇樹<sup>2</sup>・椎葉 充晴<sup>3</sup>・萬 和明<sup>4</sup>・キム スンミン<sup>5</sup> Y. TACHIKAWA, Y. FUJITA, M. SHIIBA, K. YOROZU and S. KIM

<sup>1</sup> 正会員 博 (工) 京都大学 准教授 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
 <sup>2</sup> 正会員 修 (工) J-POWER Generation (Thailand) Co., Ltd.
 <sup>3</sup> 正会員 工博 京都大学 教授 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
 <sup>4</sup> 正会員 博 (工) 京都大学 助教 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)
 <sup>5</sup> 正会員 博 (工) 京都大学 講師 大学院工学研究科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

A change of water resources in the late 21st century at the Pasak River basin in Thailand is analyzed using a distributed rainfall-runoff model and a rainfall and evapotranspiration output projected by MRI-GCM3.1S. The main findings are as follows: a projected mean annual inflow to the Pasak Dam reservoir for the near future and the late 21st century experiments decrease by 3.8% and 3.5% compared with the present climate experiment; a projected mean monthly inflow using the output of the late 21st century experiment decreases except from July to September; and to maintain a present dam outflow is difficult in the future under a scenario of the same water demand.

Key Words: Climate change, river discharge projection, Pasak river, Thailand, water resources

# 1. はじめに

地球温暖化による気候変化が水循環に影響し,水災 害の発生の仕方や水資源の変化が,社会基盤に及ぼす 影響が懸念されている.地球温暖化推計情報の高分解 能化<sup>1)</sup>に伴い,国内の河川流域でも河川流況の将来変 化が多数分析されている<sup>2,3,4)</sup>.国外においても同様 の分析が進められ,河川流況の変化が指摘されている <sup>5,6)</sup>.2011年のチャオプラヤ川の氾濫災害に見られる ように,生産拠点での水災害による経済的影響は,世 界中に波及する.気候変化に対する水災害脆弱性を検 知し,それに対する備えを講じることが重要となる.

著者らがタイ国チャオプラヤ川全流域を含む領域を 対象とし,気象庁気象研究所による温暖化予測実験デー タを用いて21世紀末の河川の自然流況の予測計算を実 施したところ,特にアユタヤ付近でチャオプラヤ川に 合流するパサック川流域(16,291km<sup>2</sup>)において将来的 に河川流量が減少する結果を得た<sup>7)</sup>.そこで本研究で は,より詳細な分布型流出モデルをパサック川流域に 適用し,パサックダムの貯水量の長期的な変化を推計 して,この地域の水資源の将来的な変化を分析する.

# 2. 対象流域

パサック川流域およびパサックダムの位置を図-1 に 示す.パサック川は最上流部をラオスに,西側をチャオ プラヤ川流域に接し,タイ国土のほぼ中央部を南に流 れた後,西に向きを変えてアユタヤ付近でチャオプラ ヤ川と合流する.パサックダムはパサック川下流部に 位置し,ダム地点の流域面積は14,520km<sup>2</sup>で,流域の 約9割を占める.堤体長4,860m,堤体高36.5mのアー スフィルダムであり,農業用水や工業用水を確保する とともに,バンコク域の洪水被害を低減する多目的ダ ムとして,1994年に着工され,1999年に完成,運用を 開始した.

#### 3. パサック川流域の温暖化推計情報の分析

(1) 降水量

気象庁気象研究所による温暖化予測実験データを用 いる.このデータは,A1Bシナリオに従って気象研究所 の超高解像度全球大気モデルMRI-AGCM3.1Sによっ て作成された空間分解能20km,時間分解能1時間の データであり,パサック川流域の水循環を表現する十 分な時空間解像度を持つ.温暖化実験データは,以下 の3つの期間に分けて提供されている.

- 1979 年 1 月-2003 年 12 月:現在気候実験
- 2015年1月-2039年12月:近未来気候実験
- 2075 年 1 月-2099 年 12 月: 21 世紀末気候実験

図-2 に現在気候実験データと APHRODITE<sup>8)</sup>を用いて作成した流域平均の月平均降水量を示す.両者とも現



図-1 パサック川流域 (HydroSHEDS をもとに作成)

在気候実験に対応して1979年から2003年までのデー タを用いた.この間の現在気候実験データの年平均降 水量は1178mm,APHRODITEは953mmであった. この違いは主として乾季後半から雨季初めの3~6月の 降水量の違いである.タイ王立灌漑局の資料によれば, 2000年から2008年の地上雨量計によるパサック川流域 の年平均降水量は1017mmであり,現在気候実験デー タの乾季の降水量は過大である可能性がある.

図-3 は温暖化実験データによるパサック川の流域平 均年降水量の変化を示したものである.25 年平均値 は,近未来気候実験は1163.1mm,21 世紀末気候実験 は1199.1mm であり,近未来気候実験は現在気候実験 に比べて約1.26%の減少,21 世紀末実験では現在気候 実験に比べて約1.80%の増加がみられた.

## (2) 蒸発散量と流出高

APHRODITE の降水量データと GAME-T2 データ センター<sup>9)</sup> にあるタイ王立灌漑局の観測流量データを 用いて,1981 年から 1999 年のパサックダム周辺の複 数の流量観測地点での流出率を計算した.年流出率は 0.1 から 0.2 の範囲にあった.この流域では,年降水量 の 8 割から 9 割が蒸発散あるいは地下浸透による損失 となることがわかる. 図-4 は流域平均の年実蒸発散量である.現在気候実験 の25年平均値は981mm,近未来気候実験では986mm, 21世紀末実験では1027mmとなり,近未来実験は現在 気候実験に比べて約0.51%の増加,21世紀末実験は現 在気候実験に比べて約4.73%の増加であった.温暖化 実験データによる流域平均の年流出高(年平均降水量 から年平均実蒸発散量を減じた値)は現在気候実験,近 未来気候実験,21世紀末実験の順に197mm,177mm, 172mmであり,平均年流出率にすると0.17,0.15,0.14 となって,将来的に流量が減少する傾向が見られた.

## 4. 分布型流出モデルの構築と流量変化の分析

#### (1) 分布型流出モデルの概要

著者らの研究グループが開発した分布型流出モデル を流出モデル<sup>10,11)</sup>を用いる.分布型流出モデルで 用いる地形データのデータソースは HydroSHEDS<sup>12)</sup> の 500m 空間分解能の標高データと河道データを用い, GeoHyMoS<sup>13)</sup>を用いて加工した.HydroSHEDS を用 いた流域地形データの加工プログラムを新たに開発し, ホームページを通じて公開している<sup>13)</sup>.

流出モデルは斜面流を追跡する分布型流出モデルと 河道流追跡モデルから構成される.流域斜面は勾配,落 水方向,面積の情報を持つ矩形斜面の集合である.斜 面流には,不飽和・飽和中間流・表面流を考慮するキ ネマティックウェーブモデル<sup>14)</sup>を適用した.河道流も キネマティックウェーブモデルを用いて追跡した.

## (2) モデルパラメータの同定と流出再現計算

降水量の観測値として APHRODITE の日降水量を 用い,蒸発散量の推定値として現在気候実験データか ら作成した期間平均(1979年1月~2003年12月)の月 蒸発散量を用いた.これらを入力値として流量計算を 行い,試算を繰り返してモデルパラメータを決定した. 対象地点はパサックダム下流のタイ王立灌漑局の流量 観測地点であり,ダム制御の影響を避けるために,パ サックダムが建設される前の1987年1月1日から1987 年12月31日の1年間をパラメータ同定期間とした.

蒸発散データは現在気候実験で算定された実蒸発散 量を与えたが, APHRODITE を用いた同定計算や再現



図-2 APHRODITE と現在気候実験 データの流域平均月降水量の比較



図-3 温暖化実験データによるパサック 川流域における年降水量の推移



図-4 温暖化実験データによるパサック 川流域における年実蒸発散量の推移



図-5 1987年の1年間の観測日流量と計算日流量の比較

|--|

$n ({\rm m}^{-1/3}{\rm s})$	$k_a ({ m m/s})$	$d_s$ (m)	$d_c$ (m)	$\beta$
0.6	0.08	1.0	0.4	12

表-2 パラメータ同定計算と再現計算の適合度指標

Year	R	$Q_p$	$N_s$	$R_Q$	$T_e$	$R_v$
1981	1026	328	0.81	1.13	2	1.13
1982	947	795	0.83	1.05	-8	0.92
1983	928	851	0.92	0.79	4	1.00
1984	973	576	0.82	0.70	-6	0.87
1985	1060	787	0.85	1.06	-7	0.96
1986	829	174	0.28	1.68	27	1.07
$1987^{*}$	990	996	0.95	0.99	-7	0.99
1988	937	419	0.53	0.65	-9	0.97
1989	867	181	-0.15	1.55	126	1.27
1990	928	731	0.82	0.63	-1	0.88
1991	874	658	0.72	0.68	-3	0.71
1992	733	294	0.74	0.73	-14	0.97
1993	735	237	0.78	0.55	16	0.86

\*:パラメータ同定計算時の適合度指標,

R: APHRODITE による流域平均年降水量 (mm),

 $Q_p$ : 観測ピーク流量 (m<sup>3</sup>/s),  $N_s$ : Nash 指標,

 $R_Q$ : ピーク流量比 (計算値/観測値) (%),

T<sub>e</sub>: ピーク生起時刻の遅れ (計算値 – 観測値) (day),

 $R_v$ : 年間総流量比 (計算值/観測値) (%)

計算では,与えた蒸発散量に見合う水分が流出モデル の斜面表層に存在しないことがある.この場合は斜面 に存在するすべての水分が蒸発するとし,斜面流出モ デルで設定しているキネマティックウェーブモデルの流 積をゼロとした.図-5 にそのパラメータを用いたとき の計算流量と観測流量を,表-1 に決定したモデルパラ メータ値を示す.河道の粗度係数は0.03m<sup>-1/3</sup>sとした.

表-2 は決定したモデルパラメータ値を用いて実施した,ダム建設着工前の年間再現計算の適合度をまとめたものである.パラメータ同定計算と同様,再現計算でも降水量はAPHRODITEの日降水量を用い,蒸発散量は現在気候実験の月平均値を用いた.1986年と1989年のように観測ピーク流量が200m<sup>3</sup>/s以下の場合はNash指標の値が低く,全体的に雨季前半の蒸発散量が過大であることが原因でこのときの計算流量が過小となる傾向が見られたが,これらの年を除くとNash指標で0.7以上あるいは年間総流量比で1.0±0.1前後であり,







図-7 温暖化実験データを用いて得た日平均ダム流入量と標 準偏差

このモデルパラメータ値で流出を再現できると考えた.

(3) 現在気候実験の計算流量と観測流量の比較

現在気候実験による日降水量と APHRODITE の日 降水量を用いて,1979年から2003年までの25年間の流 量計算を行った.蒸発散量はいずれも現在気候実験の各 月の蒸発散量の25年平均値を用いた.パサックダム地点 での25年平均の月流量を図-6に示す.APHRODITE を用いた計算流量は観測流量と近い値となったが,現 在気候実験データを用いた計算流量は,5月から10月 にかけて大きな差が現れた.これは図-2に示すように, 現在気候実験による降水量が APHRODITE よりも大 きいためである.後でこの計算流量を用いてダム貯水 量を推計する際には,いくつかの補正法を適用する.

## (4) パサックダム地点の河川流量の将来変化

現在気候実験,近未来気候実験,21世紀末気候実験 の日降水量と日蒸発散量を用いて各期間25年の流量計 算を実施した.図-7に各実験でのパサックダム地点で の日流量の25年平均値と標準偏差を示す.7月中旬か ら8月中旬は21世紀末気候実験による流量が他の気候 実験より増加するが,9月から10月の間の流量は大き く減少することがわかる.21世紀末気候実験では降水 量は7月8月に増加し9月10月は減少すること,ま た雨季の蒸発散量が増加することが全体的な流量減と なって表れている.







図-8 現在気候実験に対する月流入量比

図-9 パサックダムのルールカーブ

図-10 月平均損失量 (1999 年~2010 年)

図-8は25年平均月流量の各実験間の違いを,現在気候実験の月流量をもとにした比率で表したものである. 近未来気候実験と21世紀末気候実験での計算流量は, 雨季である7月~8月を除くほとんどの月で小さくなる.25年平均の年総流量では,近未来気候実験では現 在気候実験と比べて3.8%の減少,21世紀末気候実験で は3.5%の減少となった.

## 5. パサック川流域の水資源の将来変化の分析

前節までの準備をもとにパサックダム流入量を推定 し、いくつかのシナリオのもとにダム放流量を設定し てダム貯水量を求める.この貯水量を、現在設定され ているルールカーブ(図-9参照)との関連で分析する.

## (1) パサックダムでの水損失量の評価

第i年,第j月の貯水量の変化,月総流入量,月総 放流量,月水損失量をそれぞれ $\Delta S_{i,j}$ , $I_{i,j}$ , $O_{i,j}$ , $L_{i,j}$ とすると,月ごとの水収支は次式で表わされる.

$$\Delta S_{i,j} = I_{i,j} - O_{i,j} - L_{i,j} \tag{1}$$

将来の貯水量変化を推定するためには,水損失量 L<sub>i,j</sub> を設定する必要があるため,ダム運用開始以後の2001 年1月から2009年12月までの毎月の貯留量変化,流 入量,放流量の観測データを用いて月単位のL<sub>i,j</sub>を推 定した.図-10は得られたL<sub>i,j</sub>を用いて,損失の月平 均値を求めたものである.乾季では損失量が大きく,雨 季はダム湖への降水により損失が小さくなる.

損失の要因としては、湖面蒸発,ダム湖からのポンプ 取水,ダム湖からの漏水などが考えられる.たとえば3 月の損失量の月平均値は約24.4MCM(24.4百万m<sup>3</sup>)で あり,これを日数とダム貯水池の面積(約182.59km<sup>2</sup>)で 割ると,1日当たり平均4.3mm/dayの損失となる.現在 気候実験データの3月の実蒸発量は2.6mm/dayである. ダム湖からのポンプ取水による灌漑面積は92.5km<sup>2</sup>であ り,実蒸発量分の2.6mm/day,減水深分1mm/dayをポ ンプで供給するとすれば,ダム湖の水深で1.8mm/day の損失となり,これらを合わせると4.4mm/dayとなる ため,妥当な損失量と考えた.



図-11 温暖化時の貯水量の変化(観測流入量に温暖化時の変化) 化比率を乗じて将来流入量を設定する方法)

## (2) パサックダムの貯水量の将来変化の推計

a) 観測流入量をもとに将来流入量を設定する方法

温暖化実験データを用いて計算されるダム流入量は 過大である可能性がある.そこで現在気候実験での*i* 年*j*月の計算月流入量 *I*<sup>P</sup><sub>*i,j*</sub>の月平均値に対する近未来 気候実験および 21 世紀末気候実験での計算月流入量 *I*<sup>N</sup><sub>*i,i*</sub>, *I*<sup>F</sup><sub>*i,j*</sub>の月平均値の比率 (図-8 参照)

$$r_j^{N,P} = \overline{I_{i,j}^N} / \overline{I_{i,j}^P}, \ r_j^{F,P} = \overline{I_{i,j}^F} / \overline{I_{i,j}^P}, \ j = 1, \cdots, 12$$

を月単位の観測ダム流入量  $I_{i,j}^O, i = 2001, \cdots, 2009$  に 乗じて,近未来気候,21 世紀末気候での月単位のダム 流入量  $\hat{I}_{i,i}^N, \hat{I}_{i,i}^F$  を

$$\hat{I}_{i,j}^{N} = r_{j}^{N,P} I_{i,j}^{O}, \ \hat{I}_{i,j}^{F} = r_{j}^{F,P} I_{i,j}^{O} \ j = 1, \cdots, 12$$
(2)

と設定した. 放流量はこの期間の観測ダム放流量の月 平均値,損失量は前項で得た月平均値を用い,(1)式に よって,9年間(108ヵ月)の貯水量を連続的に計算した. 図-11に貯水量の観測値(現在気候)と計算値を示す.近 未来気候や将来気候の条件設定では30ケ月後には貯水 量がゼロとなる月が発生し,現状と同じ放流を長期に わたって実施することは困難となることがわかる.

#### b) 温暖化気候実験の計算流入量を補正する方法

前項の手法は観測流入量をもとに将来のダム流入量 を設定したため,9年分の流入量しか設定できない.そ



図-12 温暖化時の貯水量の変化 (温暖化気候実験による計算 流入量を補正する方法)

表-3 パラメータの値 (左は雨季,右は乾季を含む月)

月	a	b	С		月	a	b	С
6	0.42	0.62	-108.3	•	12	-0.23	-0.00	69.1
7	0.92	0.46	-104.4		1	0.68	0.06	31.1
8	1.03	-0.12	-32.1		2	1.76	-0.06	120.1
9	0.91	0.50	-498.7		3	1.80	-0.16	168.6
10	0.91	0.59	-559.7		4	-0.09	0.39	-66.9
11	0.81	0.48	-399.0		5	0.04	0.23	9.3

こで,現在気候実験での計算月流入量  $I^P_{i,j}$  の平均値に 対する観測月流入量  $I^O_{i,j}$  の平均値の比率

$$r_j^{O,P} = \overline{I_{i,j}^O} / \overline{I_{i,j}^P}, \ j = 1, \cdots, 12$$

を求め,この比率を計算流入量に乗じて,それぞれの 気候実験に対する補正流入量を

$$\tilde{I}_{i,j}^{P} = r_{j}^{O,P} I_{i,j}^{P}, \ \tilde{I}_{i,j}^{N} = r_{j}^{O,P} I_{i,j}^{N}, \ \tilde{I}_{i,j}^{F} = r_{j}^{O,P} I_{i,j}^{F}$$
(3)

と設定した.ここで *i* = 1,...,25 は各温暖化実験の経 過年を表す.この補正したダム流入量を用い,前項と 同じ方法で25 年間の貯水量を連続的に計算した.

図-12 に計算した貯水量を示す.前項と同様に,近未 来気候実験,21 世紀末気候実験のシミュレーションで は,約80か月後に貯水量が負となる.パサックダムの 最大貯水量は960MCMであり,このシミュレーション ではこの値を超えても貯水することを許した.そのた めに貯水量がゼロとなる次期は前項の実験よりも遅く なるが,どちらの実験でも現状と同じ放流を長期にわ たって実施することは困難となることがわかった.

c) ダム放流量を関数化する方法

前の2つのシミュレーションではダム放流量を観測値 の月平均値として与えたが,放流量はそのときの流入 量と貯水量に関連する.そこで*i*年*j*月の月放流量*O<sub>i,j</sub>* を,月流入量*I<sub>i,j</sub>と*月初めの貯水量*S<sub>i,j</sub>*の関数とし,

$$O_{i,j} = a_j I_{i,j} + b_j S_{i,j} + c_j \tag{4}$$

とモデル化して,1999年から2010年の観測データを 用いて $a_j$ , $b_j$ , $c_j$ を定めた. $O_{i,j}$ , $I_{i,j}$ , $S_{i,j}$ の単位は MCM, $a_j$ , $b_j$ は無次元, $c_j$ の単位は MCM である。



図-13 放流量と貯水量の計算値と観測値(2001年~2009年)

定めたパラメータの値を 表-3 に示す.雨季の7月~11 月は係数  $a_i$  の値が 1.0 に近く流入量に比例して放流す る,乾季の 12 月から 3 月は定数項  $c_i$  が支配的であり, ある定められた量を放流するというパターンが表現さ れている.図-13 は (4) 式による放流量と貯水量の計算 値と観測値であり,両者はよく一致した.なお,貯水 量が少ない場合に両者に違いが現れるのは,流入量の 計算値と観測値との違いが主として影響している.

次に,前項b)で作成した温暖化気候実験の補正月流 入量,(4)式による月放流量,各月の損失量を用いて月 貯水量を計算した.このとき,現行のルールカーブに 基づいて月ごとに上限貯水量を設定し,各月の計算貯 水量がそれを超える場合は超えた分を放流するという 操作を加えた.

図-14に25年間連続して計算した貯水量を示す.前述の2つの方法で得られた結果と異なり,各気候実験間で違いがなく,貯水量は現行のルールカーブの範囲内にある.これは(4)式で設定した放流量が,結果としてルールカーブを満たすように設定されていることを表す.図-15は各実験での月平均放流量を比較したものである.全体的に放流量は将来にわたって減少し,特に10月の放流量の減少量が大きい.近未来気候実験と21世紀末気候実験の年平均放流量は,現在気候実験の年平均放流量と比較して,それぞれ4.8%,6.1%減少した.つまり,将来の流入量が変化する場合,貯水量が



図-14 温暖化時の貯水量の変化 (ダム放流量を関数化する 方法)



図-15 温暖化時の月放流量の変化

現行のルールカーブを満たすように操作すると,放流 量を平均的にこの割合だけ減少させねばならないとい う結果が得られた.

#### 6. まとめ

著者らがタイ国チャオプラヤ川全流域を含む領域を 対象とした河川流量計算<sup>7)</sup>により,パサック川流域で の流量変化が検出された.この計算では,モデルパラ メータの調整などな行わず,自然流況の変化可能性の みを分析した計算であったため,モデルパラメータを 調整したより詳細な分布型流出モデルを構築し,計算 したダム流入量を補正してダム貯水量の将来変化を分 析した.その結果,将来にわたって放流量が変化しな いという条件のもとでは,近未来気候実験や21世紀末 気候実験では,現状と同じ放流を長期にわたって実施 することは困難となることがわかった.また,貯水量 が現行のルールカーブを満たすように操作すると,近 未来気候実験と比較して,それぞれ4.8%,6.1%減少さ せねばならないという結果を得た.

謝辞:本研究は文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現

象の変化予測に関する研究」によって作成された気候 シミュレーションデータを用いた.パサック川に関す る水文データはタイ王立灌漑局から提供を受けた.ま た,科学研究費基盤研究(A)23246089の補助を得た.

#### 参考文献

- S. Kusunoki, R. Mizuta, and M. Matsueda : Future changes in the East Asian rain band projected by global atmospheric models with 20-km and 60km grid size, Climate Dynamics, 37(11-12), pp. 2481-2493, 2011.
- 2) 立川康人,滝野晶平,藤岡優子,萬和明,キムスンミン, 椎葉充晴:気候変化が日本の河川流量に及ぼす影響の予 測,土木学会論文集,67(1),pp. 1-15,2011.
- 3) 佐藤嘉展,森英祐,浜口俊雄,田中賢治,小尻利治,中北 英一:気候変動に伴う先行適応のための流域スケールで の洪水および渇水リスク評価,京都大学防災研究所年報, 52B, pp. 573-586, 2009.
- 4) P. A. Jaranilla-Sanchez *et al.* : Integrated modeling of climate change impacts in the Yoshino River basin, Japan for basin management planning, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 68(4), pp. I\_133-I\_138, 2012.
- 5) T. Nakaegawa, C. Wachana and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group: First impact assessment of hydrological cycle in the Tana River Basin, Kenya, under a changing climate in the late 21st Century, Hydrological Research Letters, 6, pp. 29-34, 2012.
- 6) T. Ogata *et al.*: Past and future hydrological simulations of Chao Phraya river basin, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 68(4), pp. I\_97-I\_102, 2012.
- 7) P. B. Hunumumbura and Y. Tachikawa: River discharge projection under climate change in the Chao Phraya River Basin, Thailand, using the MRI-GCM3.1S dataset, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90A, pp. 137-150, 2012.
- 8) 大学共同利用機関法人 人間文化研究機構 総合地球環境 学研究所: APHRODITE's Water Resources, http:// www.chikyu.ac.jp/precip/(参照:2012/9/30).
- 9) 東京大学 生産技術研究所 沖研究室: GAME-T2 Data Center, http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GAME-T/GAIN-T/index.html (参照: 2012/9/30).
- 10) 椎葉充晴, 市川 温, 榊原哲由, 立川康人: 河川流域地形 の新しい数理表現形式, 土木学会論文集, 621/II-47, pp. 1-9, 1999.
- 11) 市川温,村上将道,立川康人,椎葉充晴: 流域地形の新たな数理表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発,土木学会論文集,691/II-57, pp. 43-52,2001.
- USGS : HydroSHEDS, http://hydrosheds.cr.usgs. gov/ (参照日: 2012 年 9 月 30 日).
- 13) 京都大学大学院 社会基盤工学専攻水工学講座 水文・水資源 学分野:流域地形情報を基盤とした水文モデル構築システム,http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/geohymos/geohy mos.html (参照日: 2012 年 9 月 30 日).
- 14) 立川康人,永谷 言,寶 馨: 飽和・不飽和流れの機構を 導入した流量流積関係式の開発,水工学論文集,48, pp. 7-12,2004.

(2012.9.30受付)