

## 〈論文〉

マレーシア・ジョホール川流域における降雨強度の  
変化に伴う流出量の変動解析矢澤 大志<sup>1)</sup>, 清水 芳久<sup>2)</sup><sup>1)</sup> 京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター  
(〒 525-0811 滋賀県大津市由美浜 1-2 E-mail: yazawa.taishi.25x@st.kyoto-u.ac.jp)<sup>2)</sup> 京都大学大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター  
(〒 525-0811 滋賀県大津市由美浜 1-2 E-mail: shimizu@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp)

## 概 要

近年洪水が頻発しているマレーシアのジョホール川流域において、流域統合モデルを構築し適用することで、流域環境の変化の影響を定量的に評価するためのプラットフォーム作成を行った。また、確率降水量の推定による日降水量の算出に基づいた手法と、気候変動シナリオに基づく月降水量予測値を用いた手法で降雨シナリオの作成を行った。シナリオごとの流量計算の結果、将来の確率的な降水イベントによって、洪水期間においてのより大きな出水現象が起こる可能性や、気候変動の影響による流出現象の極端化が起こることが明らかとなった。

キーワード：流域モデル, HSPF, 確率降水量, 気候変動, マレーシア・ジョホール川流域

原稿受付 2014.6.23 原稿受理 2014.8.28

EICA: 19(2・3) 92-100

## 1. はじめに

東南アジアの国々では、モンスーン気候の影響で起こる集中豪雨の発生に起因する洪水の問題と、生活・産業排水等の不十分な対策による水質汚濁の両方の問題が顕著に起こっており、これらの問題への早急な対策が必要とされている。我々の生活にとって水は欠かせないものであり、資源として適切な量と良好な質を保持していくことが今後も強く求められる。流域環境の変化が河川へ与える影響を把握し、さらにこれらの影響を軽減、防止していくためには、効果的・計画的な対策を行っていくことが必要である。これには河川だけではなく、その流域とそこでの人間活動も組み合わせた統合的流域管理の概念が重要である。

そこで本研究では、近年注目されている気候変動や、益々深刻化している異常気象などを分析し、これらが流域の水環境に与える影響の評価を行うことを主な目的とした。近年洪水が頻発しているマレーシア南部のジョホール川流域を対象として流域統合モデルを構築し適用することで、ジョホール川における流域環境、特に降水量の変化が河川流量および土砂流出量へ与える影響を評価し、効果的・計画的な流域管理政策を行っていくためのプラットフォーム作成を行う。具体的には、以下のような4つの目的を設定した。

- ① ジョホール川の流況を再現できる流域統合モデルの構築
- ② 実際に起きた流出現象の再現

- ③ 確率降水量の計算手法を基にした降雨シナリオの設計と流出解析
- ④ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 気候変動に関する政府間パネル) の気候変動シナリオを基にした流出量の変動解析

## 2. 研究対象流域および研究方法

## 2.1 研究対象流域

マレーシアは東南アジアのほぼ中央に位置しており、マレー半島南部とボルネオ島北部からなっている。赤道近くに位置しているため、年間を通して気温と湿度が高い気候となっている。それに加えて、二つの主要なモンスーン期間 (Southwest monsoon [5~9月]とNortheast monsoon [11~3月]) とその間のモンスーン期間 (inter-monsoon) が存在し、マレーシア国内のほとんどの河川流域がこのモンスーン気候の影響を受ける。マレーシアは11の行政区画 (州) から構成されており、本研究の対象としたマレーシアのジョホール川流域は、マレーシア半島最南部のジョホール州内、シンガポールとの国境付近に位置している (Fig. 1)。Table 1 にジョホール川流域の基本情報を記す<sup>1)</sup>。ジョホール川流域の中心を流れているジョホール川は全長122.7 kmあり、その河口はシンガポールとの国境 (ジョホール海峡) にある。そのため水の供給源としてのジョホール川は、ジョホール川流域だけではなくシンガポールにも重要な役割を果たしている。最近

では、2006年12月と2007年1月にジョホール川において2つの大きな洪水災害が起こった。この2期間には、Northeast monsoonに起因する集中豪雨が発生し、マレー半島南部での被害が特に大きかった。ジョホール流域内下流部に位置するコタティンギはその中でも特に大きな被害を受けた地域とされている<sup>2-4)</sup>。

ジョホール川流域を含むアジアの様々な河川流域では、このような洪水の被害を軽減する河川改修が不十分な地域もあり、今後もこのような集中豪雨に起因する洪水が発生する可能性があるため、統合的な流域管理が必要とされている。

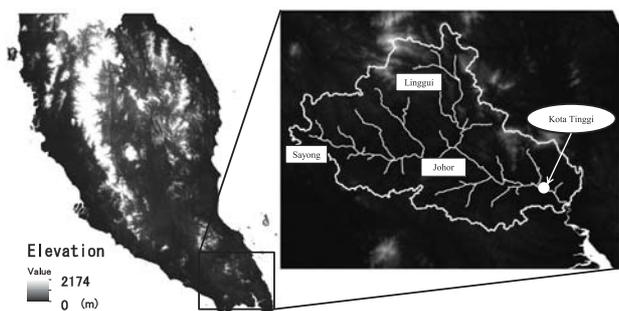


Fig. 1 Map of Johor River Watershed, Malaysia

Table 1 Basic data of Johor River Watershed<sup>1)</sup>

Length of main stream	122.7 km
Origin	Mt. Gemuruh
Main tributaries	Sayong, Linggui, Semangar, Tiram, Layang, Lebam
Main reservoirs	Linggui Dam
Mean annual precipitation	2,470 mm (basin average)
Main cities	Kota Tinggi

## 2.2 流域統合モデルの構築

近年の情報環境の発達により、様々な環境政策評価の科学的な裏付けを行うためのツールの一つとしてGIS (Geographic Information System, 地理情報システム) を用いた流域統合モデルが有効であるとされている。地理情報システムを利用することで、流域の利害関係者にわかりやすく情報を伝えることができ、意思決定や政策決定など実際の行動に移すのに有効となる。本研究では、流域統合モデルとして米国環境保護庁 (US EPA) が開発した BASINS-HSPF (Better Assessment Science Integrating Point & Non-point Sources-Hydrological Simulation Program FORTRAN) モデルを用いて、これをジョホール川流域へ適用しモデルの構築を行った。流域統合モデルは、流域をさらに分割し、流域特性の流域内での空間的分布を考慮することで、流域特性をより精度良く再現しようというモデルである。したがって、解は空間と時間の関数となり、時系列の変化だけではなく流域内での空間的な特性や変化をみることができ<sup>5)</sup>。また流域を分割することによって、任意の点で水量や水質の推定をすることが

できる。そのため、分布型モデルは流域全体に対してではなく、ピンポイントの河川対策やその評価を行うことにも役立ち、より効率的な政策を行うことが可能なツールとなる。分布型モデルでは設定が必要な項目が多く、計算も複雑であるが、情報技術の発達により精度の高い計算を比較的容易に行うことができるようになった。本モデルは、計算できるタイムステップは秒単位からの設定ができ、またほとんどのパラメータセッティングを手動で行うことができるため、拡張性の高いモデルとされており、本研究でも使用することとした。Table 2に、モデル構築の際に用いたジョホール川の流域環境情報を示す。これによって、対象流域における流域環境とその変化を考慮したシナリオシミュレーションが可能となった。

Table 2 Major data sets used in the HSPF for the Johor River Watershed

データ	名称	発行機関
標高	SRTM-3	NASA
土地利用	Global Land Cover Product	European Space Agency
降水量	TRMM_PR	JAXA
気温 日射量	Climate Forecast System Reanalysis	NCEP

BASINS-HSPF モデルは米国環境保護庁のホームページ内で無償配布されている分布型水文水質モデルであり、水文サイクル内で起こる継続的な水量・水質の変化をシミュレートする概念型のモデルである。モデル内では流出、浸透、蒸発といった流域環境中の水文現象を考慮し、水文と水質を同時に扱っている。時系列の気象データや土地被覆特性を入力して、任意地点における流出量の算出が可能である。モデル内では浸透性の陸域「PERLND (Pervious Land Segment)」, 不浸透性の陸域「IMPLND (Impervious Land Segment)」および流路区間や混合貯水池を表す「RCHRES (Reach and Reservoir)」の3つのセグメントに分かれており、それぞれでパラメータの設定を行う。そして、外部データとして流域特性データや気象データと組み合わせることで水量・水質の計算が可能になる<sup>6-8)</sup>。

## 2.3 降雨シナリオの設計

### (1) 確率降水量を用いた降雨シナリオの設計

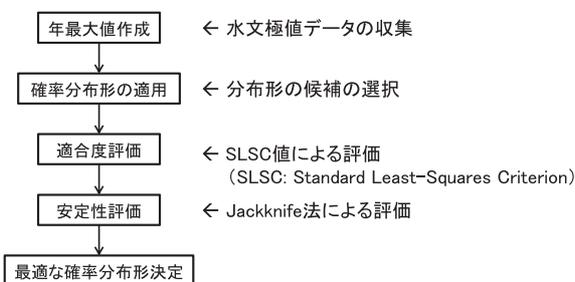
本研究では、極値分布形にデータをあてはめることにより分布形のパラメータを算出し、確率降水量を推定するパラメトリック手法を用いて算出された確率降水量をもとに降雨シナリオを設計し、モデルへの入力とシミュレーションを行った。

確率降水量の算出方法としては、宝<sup>9)</sup>や小林<sup>10)</sup>が推奨する水文頻度解析方法を用いた。この手順は以下の通りである。

- ① 水文極値データの収集・吟味 (独立性・均質性

- などをチェック)
- ② 候補となる確率分布を複数選択 (極値分布, 対数正規分布, ガンマ分布などが候補となる)
  - ③ データに確率分布形を適用 (確率紙や解析の方法を用いる)
  - ④ 当てはまり具合 (適合度) を評価 (目視, 客観的適合度評価規準による)
  - ⑤ 適合度の良い分布形を選択し, それによって再現確率統計量を計算
  - ⑥ 同程度の適合度を示す複数の確率分布に対して, Jackknife 法を適用し確率水文量の推定精度 (Jackknife 推定誤差) を求め, 誤差の小さいモデルを選択

本研究では, 推奨された水文解析の手順を踏まえて, **Fig. 2** のような計算フローで最適な確率分布形の決定および 50 年, 100 年確率降水量の推定を行った。本研究では, 降水量データ収集の対象期間は 1998 年から 2010 年の 13 年とし, 3 時間降水量, 日降水量および月平均降水量データの収集と整理を行い, 確率分布形を適用した。水文統計解析に用いられる確率分布形については, 従来から様々なものが提案され, 解析に使用されている。それらは理論的な背景やパラメータの数, パラメータの推定方法がそれぞれ異なる。**Table 3** に, 本研究にて用いた確率分布形の種類, パラメータ数およびパラメータ決定方法を示す。



**Fig. 2** Calculation procedure of rainfall probability

**Table 3** Characteristics of probability distribution models used in this research<sup>11-17)</sup>

確率分布形	パラメータ数	パラメータ決定方法
ガンベル分布	2	L 積率 (L-moment) 法
一般化極値分布	3	L 積率 (L-moment) 法
ワイブル分布	3	L 積率 (L-moment) 法
指数分布	2	L 積率 (L-moment) 法
一般化パレート分布	3	L 積率 (L-moment) 法
対数正規分布	3	積率法
	3	クオンタイル法

適合度の評価には, 標準最小二乗基準 (SLSC: Standard Least-Squares Criterion) の値を指標とした。SLSC はそれぞれの確率分布形と実際の年最大値データとの適合度を示すものであり, 次式で計算される。

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|S_{0.99} - S_{0.01}|} \quad (1)$$

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum (S_i - r_i)^2 \quad (2)$$

式(1)と式(2)で,  $S_{0.99}$  と  $S_{0.01}$  はそれぞれ非超過確率 0.99 (再現期間 100 年) と非超過確率 0.01 (再現期間 1.01 年) の時の当該確率分布の標準変量,  $S_i$  は大きい方から  $i$  番目の降水量を各分布系の推定母数で変換した標準変量,  $r_i$  は大きい方から  $i$  番目の降水量に相当する再現期間をプロット・ポジション公式<sup>18-20)</sup> (本研究では Cunnane プロット) で求め, 対応する理論クオンタイルを確率分布形によって推定した値である。SLSC の値が 0.04 以下であることが適合基準とされているが<sup>21)</sup>, この適合基準を満たすものがない場合は SLSC の値が最小の分布形を選択し, 適合基準を満たしていないことを留意した上で利用することとする。

安定性の評価には, 原標本から部分標本を抽出したり, 無作為に繰り返しを許して  $N$  個のデータを抽出したりすることにより仮想のデータセット多数作り出し, 各データセットに分布を当てはめ, 母数ないし確率水文量を推定するリサンプリング法を用いた。これによって, 確率水文量の推定精度を求め, 値の小さい確率分布形を選択する。リサンプリング法には元資料から一つだけデータを除いたデータセットを作成し, 推定誤差を求める Jackknife 法が代表として挙げられ, 本研究では, Jackknife 法に基づいて Jackknife 推定誤差を求めることにより安定性の評価を行った。

本研究では, 適合度の評価によって算出された SLSC の値を基準に分布形を複数選択し, これらの分布形に対して以下の手順<sup>22)</sup>で Jackknife 法を適用して Jackknife 推定誤差を算出した。そして確率水文量の変動制や安定度を評価し, 最終的に用いる一つの分布形を選定することとした。具体的な手順は以下の通りである。

- ①  $N$  個のデータから  $i$  番目 ( $i=1,2,\dots,N$ ) のデータのみを取り除き,  $N-1$  個のデータを用いてそれぞれの確率分布形の母数を推定し, その母数を用いて各確率分布形で確率水文量  $\theta_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) を求める。
- ② この操作を  $N$  回繰り返すことで  $N$  個の確率水文量を算出し, 以下の式により推定誤差分散  $s^2$  を求める。

$$s^2 = (N-1) \sum_{i=1}^N (\theta_i - \bar{\theta})^2 \frac{1}{N} \quad (3)$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i \quad (4)$$

以上の水文解析の手順を用いて確率降水量の評価を

**Table 4** SLSC value for each probability distribution model

	ゲンベル	一般化極値	ワイブル	指数	一般化パレート	対数正規	
						積率法	クオンタイル法
SLSC	0.044	0.044	0.044	0.053	0.048	0.053	0.048

行った。**Table 4**に各確率分布形で求めたSLSCの値を示す。SLSCの値は0.04以下であることが良好な適合基準とされているが、本研究における計算結果の中でこの適合基準を満たすものは存在しなかった。そのため、SLSCの値が最小の分布形を選択することとした。得られたSLSCの値より、本研究では最小のSLSCの値が得られたゲンベル分布、一般化極値分布およびワイブル分布の3つの確率分布形を選択し安定性の評価を行った。安定性の評価には前述したJackknife法を用いて推定誤差を計算し、今後の解析で用いるための最終的な確率分布形としてこの推定誤差値が小さいものを選択した。**Table 5**に、計算されたJackknife推定誤差を示す。ここでは、元となる標本数の少なさから、一般化極値分布によるJackknife推定誤差の値を得ることはできなかつたため、候補からは除外した。

**Table 5** Evaluated value of jackknife estimation error

確率年 (T)	Jackknife 推定誤差		
	ゲンベル	ワイブル	一般化極値
50	32.5	23.6	No data
100	37.2	24.6	No data
150	39.9	25.2	No data
200	41.9	25.5	No data

本研究ではSLSCの値が最小かつJackknife推定誤差の小さかったワイブル分布を降雨シナリオの基とする確率分布形に採用した。

推定された確率降水量の値を用いて、ジョホール川流域における降雨シナリオの設計を行った。本研究では、まず時系列の降水量シナリオを設定するため、あるイベント期間に観測されたジョホール川流域での最大日降水量が確率降水量になる確率降水量増加率を求めた。本研究では、対象イベント期間を近年最も洪水の被害が大きかった報告がある2006年12月16～21日の6日間（イベント1）と、2007年1月9～14日の6日間（イベント2）とし、これを基本シナリオとした。各イベントにおける再現期間の推定値は、イベント1で18年、イベント2で23年である。また、計算対象地点はジョホール川流域内下流部に位置するコタティンギ地域とした。そして、対象イベント期間全体の時系列降水量分布（本研究では、3時間降水量）に対して求めた増加率を乗じることで、確率降水量シナリオの降雨時系列とした。

(2) 気候変動シナリオを用いた降雨シナリオの設計

気候変動シナリオを用いた降雨シナリオの設計方法としては、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) における排出シナリオ<sup>23)</sup> (Special Report on Emission Scenarios, SRES) に基づいて、全球気候モデルを用いて予測された降水量データを用いた。本研究では、SRESの中でも「A1B (エネルギー源バランス重視型)」、 「A2 (多元化型)」 および 「B1 (持続発展型)」 の3つのシナリオの下に、全球気候モデルで予測された近未来 (2046-2065年) および将来 (2081-2100年) の月平均降水量データを用いた。全球気候モデルとしてはMIROC3.2 (medres) モデルを選択し、近未来および将来のSRES別月平均降水量の予測値を使用した。

3. 降雨シナリオに基づく流出量の変動解析

3.1 基本シナリオの適用

本研究では、BASINS-HSPFモデルを用いてジョホール川流域の流域統合モデルの構築を図った。しかし本研究では、対象流域の実測データの不足から、長期的な観測データに基づくモデルの校正を現状では行うことができなかった。そこで、現時点で流量実測値が利用可能である2006年9月から2007年2月を対象に日単位の流量計算を行い、モデル間での流量計算結果の比較を行うこととした。また、当該期間においてハイドログラフの当てはまりや決定係数 ( $R^2$  値) から各モデルの適合度を評価した。Moriyas et al.<sup>24)</sup> および N. N. Tue<sup>25)</sup> によれば、モデルの再現性に関しては、決定係数 ( $R^2$ ) の値が0.50であることが、十分な適合度を示す判断基準としている。計算対象地点は、2006年12月と2007年1月に実際に起こった洪水において最も被害が大きく、流量の時系列データの測定地点である、ジョホール川流域下流にあるコタティンギ地域とした。

**Fig. 3** に HSPF モデルで計算された結果によるハイドログラフを、また **Fig. 4** に当該期間におけるモデル再現性 ( $R^2$  値) を示す。HSPF モデルによる計算値は、出水時の流量を過大評価する傾向があるが、 $R^2$  値は0.59と十分な再現性が得られた。出水時の流量の過大評価の要因としては、モデル内の土壌の浸透容量パラメータ (表面流出および中間流出へ影響) および中間流出パラメータの設定値の影響が考えられ、モデルの再現性を高めるために今後これらのパラメータ設定値の更なる検討が必要である。

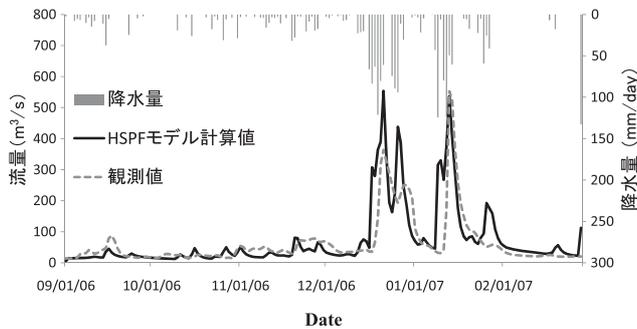


Fig. 3 Simulation results of daily flow rate at Kota Tinggi

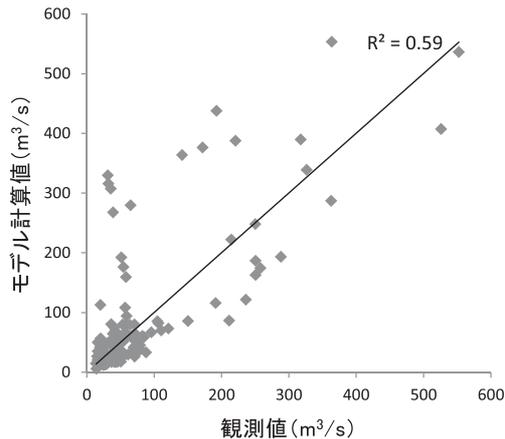


Fig. 4 Reproducibility of daily flow rate between simulated value and observed value

Fig. 5 に、HSPF モデルで計算されたコタティンギ地域における 2006 年 9 月から 2007 年 2 月の土砂流出量の時間変化を示す。本研究では、土砂流出量の実測値は入手できておらず、モデルの校正と適切なパラメータの設定を行うことができない。しかし、FAO (Food and Agriculture Organization of the United States) の Global River Sediment Yields Database<sup>26)</sup> によれば、ジョホール川流域における年平均土砂流出量は 157,070 ton 程度であると推定されている。また、HSPF モデルにおけるジョホール川流域の 2005 年～2010 年の平均年間土砂流出量の計算値は 107,032 ton であった。これより、HSPF モデルにおける土砂流出量計算値はオーダーレベルでの再現性を得ており、土砂流出量解析へのモデル適用可能性が確認できたものと言える。

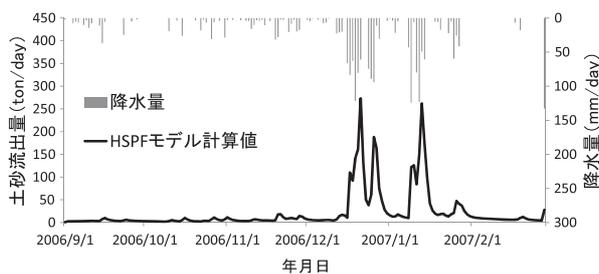


Fig. 5 Simulation results of sediment yield at Kota Tinggi

### 3.2 確率降水量シナリオの適用

#### (1) 河川流量への影響分析

Fig. 6 に確率降水量推定の結果を実際のイベント期間の降水量にあてはめた結果と、それを用いて流量の計算を行った結果を示す。確率降水量の推定結果より、イベント期間中における降水量は 50 年確率で実測雨量の 2.20 倍 (イベント 1) および 2.15 倍 (イベント 2)、100 年確率で 2.37 倍 (イベント 1) および 2.32 倍 (イベント 2) となるという推定結果が得られた。確率降水量シナリオをモデルへ適用し流量の計算を行った結果を Fig. 7 に示す。イベント内での平均流量は 50 年確率で基本シナリオよりも 2.48 倍 (イベント 1) および 2.19 倍 (イベント 2) に、100 年確率では 2.69 倍 (イベント 1) および 2.37 倍 (イベント 2) になることが予測された。また最大流量では 50 年確率で基本シナリオよりも 2.47 倍 (イベント 1) および 2.37 倍 (イベント 2) に、100 年確率では 2.71 倍 (イベント 1) および 2.57 倍 (イベント 2) に増加することが予測された。このことから、イベント期間中における降水量の増加に伴う流量の増加が確認され、確率的に起こりうる降水量の増加は、より深刻な洪水を引き起こす危険性があるということが示唆された。また、得られたハイドログラフ (Fig. 8) より、イベント期間中における降水量の増加はピーク流出量を高め、洪水期間においてのより大きな出水現象が起こる可能性があるということが示唆された。また、降水量の増加は、イベント期間後の流量の減少を遅らせることもわかった。このことは、降水量の増加に伴い、より長期的な洪水被害が起こりうることを意味している。

以上の河川流量推定結果より、現状の流域環境において確率的に起こり得る降水イベントは、洪水が発生する可能性を大いに高め、被害を増大させるということが明らかとなった。したがって、今後は洪水リスク回避に向けてより詳細な分析とその後の対策が必要であると考えられる。

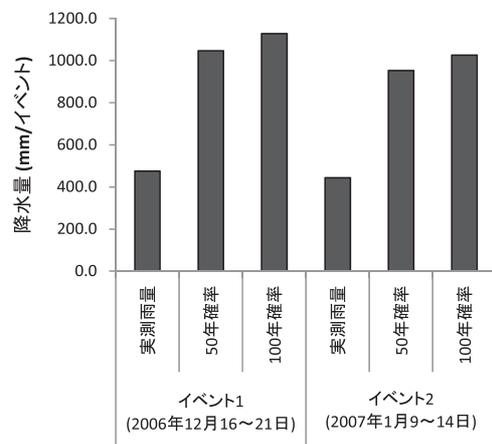


Fig. 6 Estimated result of amount of rainfall for 50 and 100 year return periods

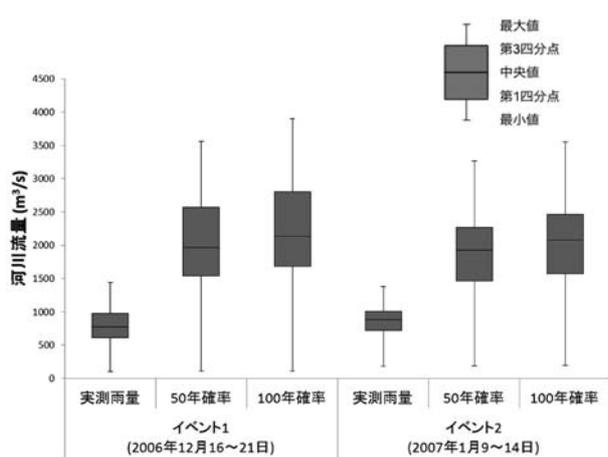


Fig. 7 Simulated flow rate for each return period

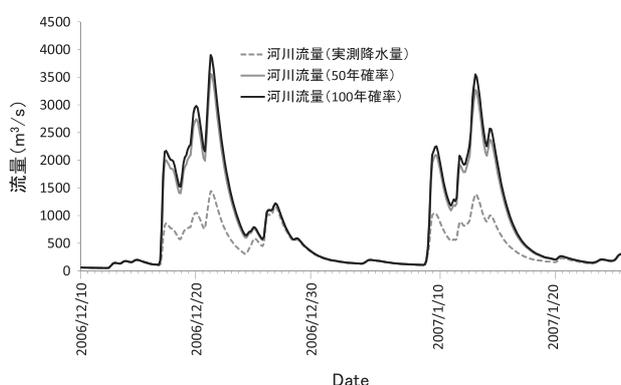


Fig. 8 Simulated hydrograph for each return period

(2) 土砂流出量への影響分析

イベント期間中の降水量の増加が土砂流出量に与える影響について考察する。Fig. 9にイベント期間中における再現期間別の土砂流出量を示す。イベント期間中のシナリオ解析による合計土砂流出量は、50年確率降水量では3.68倍(イベント1)および3.13倍(イベント2)、100年確率降水量では4.10倍(イベント1)および3.46倍に増加する結果となった。これは前述の河川流量の増加率を大きく上回る結果となった。したがって、河川内の土砂流出量は河川流量の増加だけでは依存せず、他のファクターも関与しながら増加していることがわかる。河道内への流出量そのものの増加や、陸域での斜面浸食などの要素に伴う土砂流出量の増加など考えられる。ジョホール川流域では、実際のイベント1期間の洪水における上流域での河川の土砂流出が特に激しかったという報告があり<sup>2)</sup>、また、イベント1期間の洪水の浸水によって堆積した土砂が、イベント2期間の洪水において流出したという報告もある<sup>2)</sup>。そのため、今後は分布型モデルを利用して土地利用や上流から下流にかけての流程に着目した解析が必要であると考えられる。

この解析によって、確率的に起こる降水量の増加は河川流量だけではなく土砂の流出量増加を伴い、流量

や水位といった水量面の対策だけではなく、流出土砂対策も必要とされることが明らかとなった。

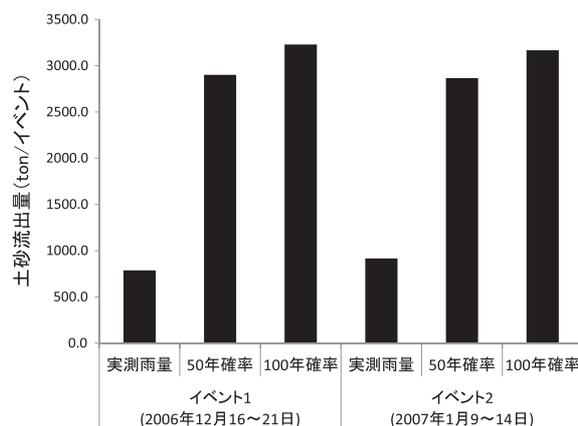


Fig. 9 Simulated sediment yield for each return period

3.3 気候変動シナリオの適用

(1) 河川流量への影響分析

Fig. 10およびFig. 11に各イベント期間において計算された近未来および将来のシナリオ別河川流量推定値を示す。近未来予測において、イベント1期間の流量は全シナリオで増加傾向にあり、平均流量で1.12(A2シナリオ)~1.16倍(B1シナリオ)となった。ピーク流量もほぼ同等の増加率を示しており、イベント1期間においては気候変動に伴う流量増加が予測された。一方でイベント2期間においては、流量は0.85(A2シナリオ)~0.96倍(A1B, B1シナリオ)になり、基本シナリオに比した平均流量とピーク流量は、近未来予測では減少傾向になると推定された。将来期間の予測では、両イベント期間においてほとんどのシナリオで平均流量、ピーク流量共に増加傾向になることが明らかとなった。特に高成長社会シナリオを描くA1Bシナリオでは流量の上昇が著しく、将来的な気候変動による洪水被害が増加する可能性が示唆された。しかし、持続発展型社会シナリオを描くB1シナリオでは、近未来予測同様イベント2期間における流量が減少傾向を示した。以上の結果より、将来的な気候変動が河川流量へ与える影響は、対象とするイベントの発生する月によって異なり、流出量が増加するイベントと減少するイベントの差が大きくなる場合があることがわかった。これによって、イベントの起こる時期によって平均流量およびピーク流量の極端化が起こることが示唆された。

(2) 土砂流出量への影響分析

気候変動が河川の土砂流出量へ与える影響について考察する。Fig. 12およびFig. 13に近未来と将来のシナリオ別土砂流出量の予測値を示す。これらの結果より土砂流出量の増減は、流量の増減と類似した傾向を示していることがわかる。

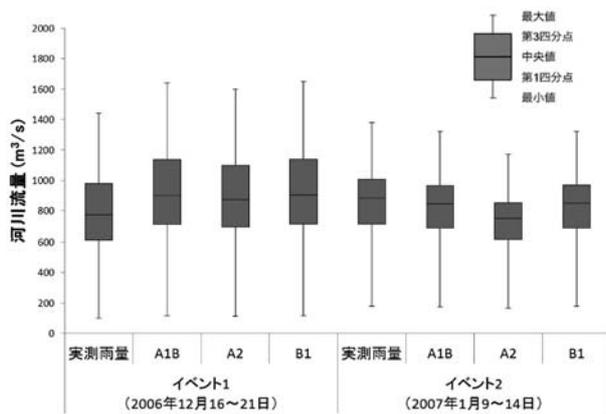


Fig. 10 Simulated flow rate in the near future (2046-2065)

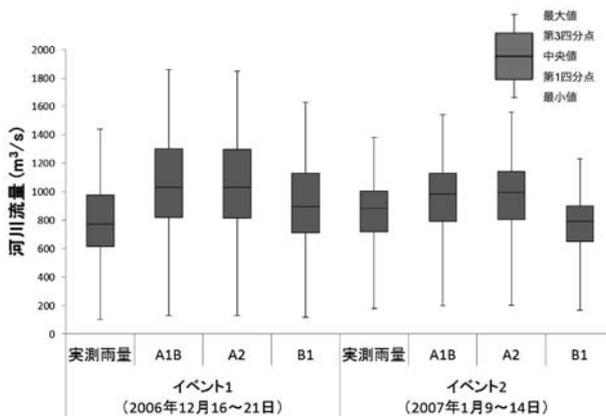


Fig. 11 Simulated flow rate in the future (2081-2100)

近未来予測では、合計土砂流出量がイベント1期間において、1.19 (A2 シナリオ)~1.25 倍 (B1 シナリオ) と増加傾向を示すことが予測され、イベント2においては0.77 (A2 シナリオ)~0.94 倍 (B1 シナリオ) と減少傾向を示すことが予測された。将来予測における合計土砂流出量は、イベント1期間において1.23 (B1 シナリオ)~1.51 倍 (A1B シナリオ)、イベント2期間において0.84 (B1 シナリオ)~1.21 倍 (A2 シナリオ) となることが推定された。

以上の結果より、イベント期間ごと、シナリオごとに土砂流出量の増減傾向は異なることが明らかとなった。特に、高成長社会シナリオを描くA1Bシナリオは他のシナリオに比較して土砂流出量の推定値が大きくなっており、気候変動によって将来的な河川の土砂流出量へ影響があることが明らかとなった。流量の予測値にも同様の傾向がみられたように、土砂流出量が増加傾向にあるイベント1と減少傾向にあるイベント2の差が大きくなっていることから、シナリオによっては降雨イベントによる土砂流出現象の極端化が進むといったことが示唆された。

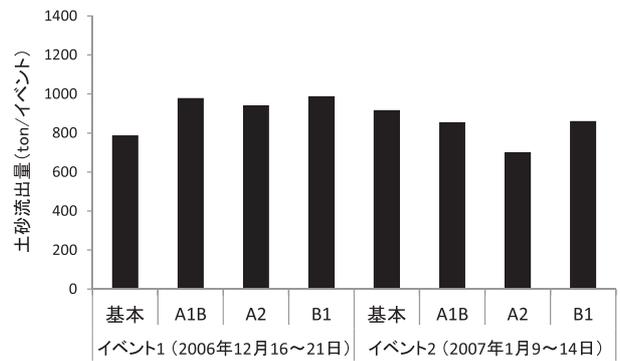


Fig. 12 Simulated sediment yield in the near future (2046-2065)

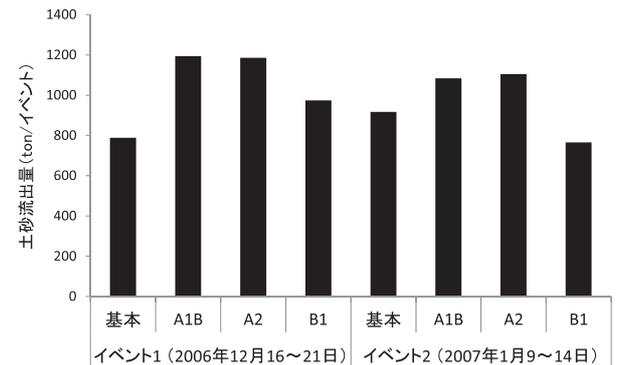


Fig. 13 Simulated sediment yield in the near future (2081-2100)

#### 4. 結 論

本研究では、流域統合モデルをマレーシアのジョホール川流域へ適用してモデルを構築し、流出解析を行った。その結果を以下に記す。

- 1) 流域統合モデルの一つであるBASINS-HSPFモデルをジョホール川流域へ適用してモデル構築を行った。モデル構築に必要な流域情報を収集し、流域データとして入力した。これによって、対象流域における流域環境とその変化を考慮したシナリオシミュレーションが可能となった。
- 2) 確率降水量の推定では、イベント期間中における降水量は2.15~2.37倍となるという推定結果が得られた。また確率降水量シナリオ解析により、イベント期間中において降水量の増加に伴う流量の増加が確認され、確率的な降水イベントによりさらに深刻な洪水の危険性があるということが示唆された。また、確率的に起こる降水量の増加は流量だけではなく土砂の流出量増加を伴い、流量や水位といった水量面の対策だけではなく、流出土砂対策も必要とされることが示唆された。
- 3) IPCCのSRESに基づく気候変動シナリオが河川流量へ与える影響についての分析の結果、対

象とするイベント、期間、およびシナリオごとに流出量の変動傾向は異なり、将来的な気候変動は、流出量が増加するイベントと減少するイベントの差を大きくする可能性があること（流出イベントの極端化）が明らかとなった。

今後は、現地観測データを収集、利用して、より再現性の高い流域モデル構築を行い、これらの流域統合モデルを有効に活用し、政策を提言することで、実際の流域管理政策へ役立たせることが望まれる。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会アジア研究教育拠点事業(ACP)とマレーシア教育省によって支援されている、「リスク評価に基づくアジア型統合的流域管理のための研究教育拠点」の下で実施しました。

## 参考文献

- UNESCO (1997): Catalogue of Rivers for Southeast Asia and the Pacific, Malaysia-2, Sungai Johor, p. 214.
- Shafie, A. (2009): Extreme Flood Event: A Case Study on Floods of 2006 and 2007 in Johor Malaysia, Colorado, p. 44.
- Government of Malaysia Department of Irrigation and Drainage (2009): DID Manual, 1, p. 5A-1.
- Razi M. A. M., Ariffin J., Tahir W. and Arish N. A. M. (2010), Flood Estimation Studies using Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) Johor River, Malaysia, Journal of Applied Sciences, 10(11), 930-939.
- 山下隆男, 嵯峨拓朗 (2005): 流域水文モデル HSPF による沿岸海域への物質輸送シミュレーション, 海岸工学論文集, 52, pp. 1101-1105.
- 佐藤圭輔, 椿 涼太, 戸田祐嗣, 辻本哲郎 (2009): 水・物質に与える政策シナリオ評価: GIS を用いた流域モデルの設計と実流域への適用, 環境システム計測制御学会誌, 14, pp. 70-74.
- Im S., Brannan K., Mostaghimi S. and Cho J. (2003), A Comparison of SWAT and HSPF Models for Simulating Hydrologic and Water Quality Responses from an Urbanizing Watershed, Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems.
- U. S. EPA (2001): HSPF Version 12 User's Manual.
- 宝 馨 (2006): 大標本時代の水文頻度解析手法 —— リターンペリオドを超えるようなサイズの標本に対する極値データ解析 ——, 京都大学防災研究所年報, 49 (B), pp. 7-12.
- 小林健一郎 (2010): 極端気象による洪水災害の統合的シミュレーションとリスク分析, 京都大学大学院工学研究科, pp. 87-89.
- 宝 馨, 高棹琢馬, 清水 章 (1989): 極値分布の母数推定法の比較評価, 京都大学防災研究所年報, 32(B-2), pp. 455-469.
- 星 清 (1998): 水文統計解析, 開発土木研究所月報, 540, pp. 31-63.
- 合田良実 (2010): L-モーメント法を用いた高波の極値統計解析におけるプロットイング・ポジション公式の選択と各種統計量の信頼区間, ECOH/YG 技術論文, No. 13.
- 合田良実, 久高将信, 河合弘泰 (2009): L-moments 法を用いた波浪の極値統計解析について, 土木学会論文集 B2, B2-65(1), pp. 161-165.
- M. R. Islam, R. Saidur, and N. A. Rahim (2011), Assessment of Wind Energy Potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull Distribution Function, Energy, 36, 985-992.
- W. Z. Wan Zin, A. A. Jemain, K. Ibrahim (2009), The Best Fitting Distribution of Annual Maximum Rainfall in Peninsular Malaysia based on Methods of L-moment and LQ-moment, Theoretical and Applied Climatology, 96, 337-344.
- Zalina M. D., Amir H. M. K., Mohd N. M. D. and Van-Thanh-Van N. (2002), Statistical Analysis of At-site Extreme Rainfall Processes in Peninsular Malaysia, FRIEND 2002- Regional Hydrology: Bridging the Gap between Research and Practice, 61-68.
- Hazen, A. (1914): The Storage to be provided in Impounding Reservoirs for Municipal Water Supply, Transactions of the American Association of Civil Engineers, 77, pp. 1539-1669.
- Gringorden, I. (1963): A Plotting Rule for Extreme Probability Paper, Journal of Geophysical Research, 68, pp. 813-814.
- Cunnane, C. (1978): Unbiased Plotting Positions — A Review, Journal of Hydrology, 37, pp. 205-222.
- 田中茂信, 寶 馨 (1999): 河川流量の頻度解析における適合度と安定性の評価, 水工学論文集, 43, pp. 127-132.
- 石原幸治 (2012): 地域頻度解析の有効性評価と地球温暖化に伴う将来変化予測への応用に関する研究, 京都大学大学院工学研究科, pp. 19-28.
- 環境省地球環境局 (2001): IPCC 排出シナリオ (SRES) に関するサーベイ, 4つの社会・経済シナリオについて, 温室効果ガス排出量削減シナリオ策定調査報告書, pp. 3-21.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith (2007), Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, American society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-235, 50(3), 885-900.
- N. N. Tue (2013), For Applying Integrated Lake Basin Management Concept in Northern Vietnam: A Case Study of Thac Ba Watershed, 京都大学大学院工学研究科, pp. 47-49.
- Food and Agriculture Organization of the United States: Global River Sediment Yields Database, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/sediment/>

## Runoff Simulation with the Change of Rainfall Intensity in the Johor River Watershed, Malaysia

Taishi Yazawa<sup>1)†</sup> and Yoshihisa Shimizu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Research Center for Environmental Quality Management, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Taishi Yazawa :  
(Research Center for Environmental Quality Management, Kyoto University  
E-mail : yazawa.taishi.25x@st.kyoto-u.ac.jp)

### Abstract

To utilize river water appropriately and safely, it is necessary to understand the situation of the watershed. In recent years, the GIS-based hydrological simulation models have been developed to achieve these purposes. The objective of this research is to formulate a platform for the effective integrated watershed management. This research includes a case study using the BASINS-HSPF (Better Assessment Science Integrating Point & Non-point Sources-Hydrological Simulation Program FORTRAN) model. Johor River Watershed in Malaysia experienced two big floods in December 2006 and January 2007 caused by the Northeast Monsoon. Therefore, this research set two scenarios to these floods. One is the rainfall scenario with the method of rainfall probability and another with the Special Report on Emission Scenarios of Intergovernmental Panel on Climate Change. By applying these scenarios to the watershed model and performing runoff simulation, this research revealed that these scenarios accelerate the intensity of the river flow rate.

**Key words :** watershed model, HSPF, rainfall probability, climate change, Johor River Watershed