

〈ノート〉

フィリピン・パンパンガ川流域における SWAT モデル適用性の評価と検証

矢澤大志^{1,2)}, 本田貴之³⁾

¹⁾立命館大学 理工学部 環境都市工学科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1 E-mail: yazawa-t@fc.ritsumei.ac.jp)

²⁾Master's Program in Environmental Engineering, Vietnam Japan University, Vietnam National University, Hanoi

³⁾立命館大学 理工学部 環境システム工学科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1 E-mail: rv0072fv@ed.ritsumei.ac.jp)

概要

本研究はフィリピン・パンパンガ川流域への Soil & Water Assessment Tool モデルの適用と仮定の対照流域の設定により、流域の水源涵養機能のポテンシャルを検証した。全球データと米国のデータベースを組み合わせモデルを構築し、月別日平均河川流量を計算した。流域内の森林拡大・回復シナリオ下では、乾季の流量変化率 (-5.0~0.4%) に比べて雨季の流量変化率 (-9.2~0.0%) が大きくなり、雨季の洪水緩和が期待できることが明らかとなった。今後水文モデルを用いて流域の持つポテンシャルや特性を評価し、効果的な水資源管理の設計へ役立てていくことが望まれる。

キーワード：パンパンガ川流域, SWAT, 水資源管理, 土地被覆変化, 水源涵養機能

原稿受付 2021.5.28 原稿受理 2021.8.31

EICA: 26(2・3) 51-59

1. はじめに

東南アジア諸国では雨季の洪水と乾季の渇水の両極端現象が頻発している。本研究の対象であるフィリピンでは、依然として台風やラニーニャの影響による洪水被害が発生している^{1,2)}。そのため首都圏だけではなく農業・工業地帯においてもその経済的なダメージは大きく、常に対策が求められている。他方で、即座に人命には係わらない渇水と水不足への対策は後手に回っている。フィリピン・マニラ首都圏ではエルニーニョの影響により2010年に渇水と水不足を経験している。また、2019年3月から約3か月にわたりこの10年で最も深刻な“Water Crisis”とも呼ばれる水不足に見舞われたことで、100万世帯を対象に3か月間におよぶ計画断水が実施される等、渇水・水不足も首都圏の市民の生活や経済に大きなダメージを与えている³⁻⁵⁾。マニラ首都圏への水供給の約97%は、首都圏外にあるアングット (Angat) 川流域に位置する築53年の Angat ダム (1日約40億リットル給水) を中心とした Angat-Ipo-La Mesa Water System に依存している⁶⁾。現状では金銭的な投資が必要となる水供給設備の更新や増設に頼った水資源管理を即座に行うことは困難であり、一度水不足が始まれば市民への節水の呼びかけ、計画断水や給水制限等、水利用者へ負担を強いる管理が中心となっている⁷⁾。近年フィリピンには日系・外資系企業が多く進出しサービス業の発展

とともに経済成長を続けているが、製造業や農林水産業も盛んである。その中で今後の気候変動や人口集中等によるフィリピンの河川流域への影響^{6,8)}を考慮すれば、水資源の確保と安定化、そしてその管理は重要課題である。

前述の Water Crisis に対応してフィリピンでは2019年に Department of Water Resources (DWR) を設立することが承認され、統合的な水資源管理への注目が高まっている⁹⁾。効果的な水資源管理の検討を行うためのツールとして水文モデルの活用が期待されており、Soil & Water Assessment Tool (以下、SWAT モデル) はその一つとして広く使用されている。SWAT モデルは米国での試験研究に基づいた独自のパラメータデータベースを有しており、他の代表的な水文モデル (Hydrological Simulation Program-FORTRAN や HEC-HMS 等¹⁰⁾) よりも適用が容易であるため近年東南アジアでの適用例も増えている¹¹⁾。フィリピン国内の河川流域でも SWAT モデルは環境影響評価に有用であることを述べている既往研究^{12,13)}が存在するが、その適用事例は他の東南アジア諸国に比べて少ない^{11,14)}。その主な原因の一つとして、東南アジアでは設備や予算等の制約によりモデル構築に必要な現地データが十分に整備されていないことや、利用可能データの信頼性、そしてデータへのアクセス制限 (有償であることや、現地の研究者しか利用できない等) が挙げられる^{11,15-17)}。例えばフィリピン国内の

河川流域で流量や土砂流出量を対象として SWAT モデルを構築した研究事例^{12,13,18,19)}では、流域管理（農林業システムの最適化等）の効果および森林伐採のリスクの評価¹²⁾、土地利用指標に対する月流量の感度分析¹³⁾、そして土地被覆の変化に対する水収支の変化を分析¹⁸⁾している。しかし、現地観測データがないためモデルの校正は行っていないことや¹²⁾、短期間の実測データを基にパラメータの最適化を行っているため長期の観測データが必要であること¹³⁾、利用するデータ間の取得年が大幅に異なること¹⁸⁾（例えば、2010年の土地利用データを使用しているが、モデルの校正には1986～1991年の実測値を使用する等）、そして現地特有の土地利用に対してはパラメータデータ不足のためモデルの精度が不十分となること¹⁹⁾が課題となっている。またいずれの事例もフィリピン国内の現地データを組み込みながら SWAT モデルを構築しているものの、データの出典は多岐にわたっている。米国外の流域で適用してモデルの精度を保証するためには、現地調査で実際の環境や水文現象を把握し、その情報を根拠に関係式のパラメータを細かく調整、再分類する必要がある¹⁷⁾。しかし、フィリピンではモデル構築の基礎となる現地情報データが少ないためモデル適用例を増やすことが難しい。

そこで本研究では、フィリピンのパンパンガ川流域を対象として全球データを用いて SWAT モデルを構築し、現地データが少ない、もしくはアクセスのない状況での水文モデル適用可能性を調査する。そして SWAT モデルの活用例として、流域内の土地被覆割合を変化させ仮想の対照流域を設定することで流域の

水源涵養機能（洪水緩和および渇水緩和）²⁰⁾のポテンシャルを検証することを目的とする。水資源管理のための構造物への金銭的な投資が難しい状況に鑑みれば、水文モデルの活用方法として考えられる、流域の特性を活かした持続可能な管理方法の検討はフィリピンの水資源管理に有用である。本研究はフィリピンにおける水文モデル活用に関して、流域の持つポテンシャルを評価するという新たな例を提示し、今後の効果的・効率的な水資源管理シナリオ構築へ役立てることができると期待される。

2. 研究方法

2.1 研究対象流域

本研究の対象流域はフィリピンのルソン島中部にあるパンパンガ（Pampanga）川流域である。パンパンガ川はフィリピンで5番目に長く、流域面積としては4番目に大きい。その主流河川長は230.5 km、流域面積は9,100.8 km²である。現在、マニラ首都圏の水不足緩和へ向けてはルソン島中部ケソン州にあるカリワ（Kaliwa）川を対象にしたカリワダム建設計画が中心となっているが^{21,22)}、融資契約上の問題²³⁾や環境・生態系への影響^{24,25)}を懸念して反対も多い。そのため、パンパンガ川も追加的な代替水源として期待されている⁶⁾。

対象流域の位置を Fig. 1 に示す。パンパンガ川流域では下流域のパンパンガデルタをはじめとして農業が盛んである中、雨季の洪水だけではなく乾季の灌漑用水の不足が問題となっている。そのためフィリピン

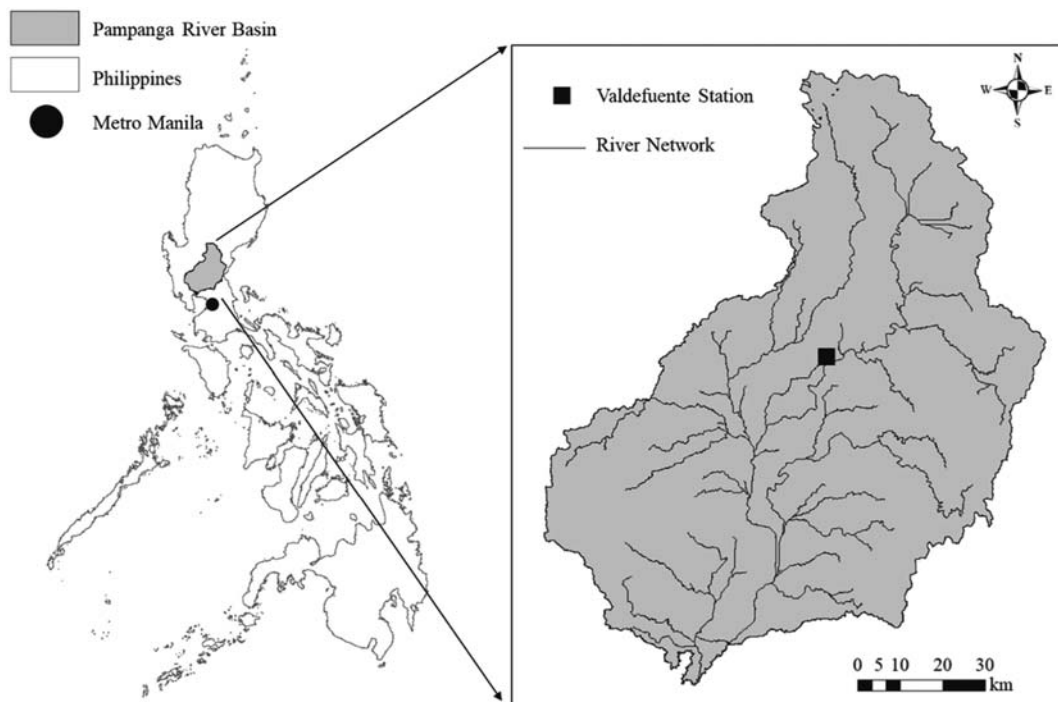


Fig. 1 Location of the Pampanga River Basin, Philippines

国内でも安定した水資源管理が課題とされている流域の一つである。

2.2 水文モデル構築

本研究では、米国テキサス農工大学と米国農務省農業試験場によって開発されたSWATモデルを適用し水文モデルを構築した。Fig. 2に水文計算を例にした

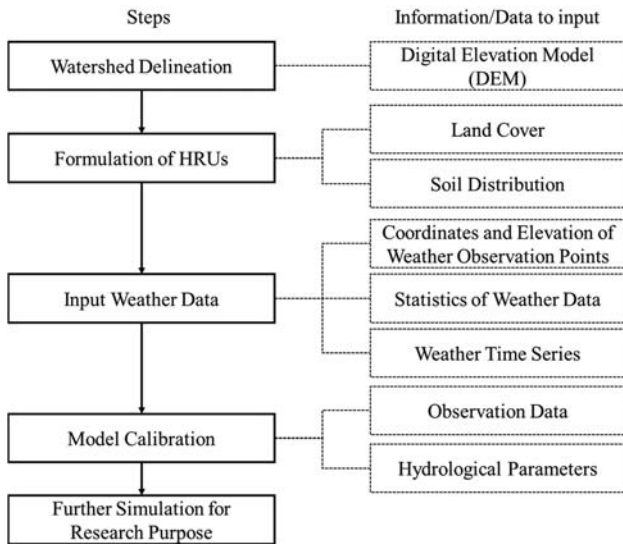


Fig. 2 Procedure and information/data required in the SWAT model application to hydrological simulation

SWATモデルの構築フローと必要な情報、データを示す。本研究のSWATモデル構築過程では、Table 1のような無償かつ全球で利用可能なデータを使用し、モデル校正のみ現地観測データを使用した。

SWATモデルは流域を Hydrologic Response Units (HRUs) と呼ばれる土地被覆、土壌、傾斜の組み合わせによって流出機構を細かく分類し水文計算を行う²⁶⁾。表面流出、蒸発散、浸透といった水文過程の計算式はSWATモデルの Theoretical Document²⁷⁾に詳述されている。SWATモデルでは気象データの欠測を補完するため気象統計値の入力が求められるが、既往研究における計算手順では省略されていることが多い。しかし実際は各気象観測ポイントにおいて長期(10年以上)の気象データを基に、あらかじめ気象統計値を計算し入力する必要がある^{28,29)}。Table 2にSWATモデル構築に必要な気象統計値を示す。ここで、SWATモデルユーザーに広く利用され、また本研究でも使用しているCFSR (Climate Forecast System Reanalysis)の気象データでは露点温度が提供されていないため、DEWPT (露点温度の月別平均値)を直接計算することができない。そのため本研究では、CFSRから提供されている気温および相対湿度データを用いて、下記の式(1)~(3)によって露点温

Table 1 Data sets collected and used in this research

Data type	Data set	Period	Source agency
Precipitation	Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	1979-2013	National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
Temperature			
Relative humidity			
Wind speed			
Solar radiation			
DEM			
Land cover	Global Land Cover Product	2009	European Space Agency
Soil	Global Soil Regions Map	2005	Natural Resources Conservation Service Soils, United States Department of Agriculture (USDA-NRCS)
Flow rate	Observed daily flow rate	2005-2006	Department of Public Works and Highways (DPWH)

Table 2 Statistics of weather data required to input in the SWAT model application

Parameter	Description and unit
TMPMX	Average maximum air temperature for each month (°C)
TMPMN	Average minimum air temperature for each month (°C)
TMPSTDMX	Standard deviation of maximum air temperature for each month (°C)
TMPSTDMN	Standard deviation of minimum air temperature for each month (°C)
PCPMM	Average precipitation in each month (mm)
PCPSTD	Standard deviation for daily precipitation in each month (mm/day)
PCPSKW	Skew coefficient for daily precipitation in each month
PR_W1	Probability of wet day following dry day in each month
PR_W2	Probability of wet day following wet day in each month
PCPD	Average number of days of precipitation in each month
RAINHHMX	Maximum 0.5 h rainfall in each month for entire period of record (mm)
SOLARAV	Average daily solar radiation for each month (MJ/m ² /day)
DEWPT	Average dew point in each month (°C)
WINDAV	Average wind speed in each month (m/s)

度を計算した^{30,31)}。

$$e_s = 6.108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T}{T + 237.3}\right) \quad \dots(1)$$

$$e_a = RH \times \frac{e_s}{100} \quad \dots(2)$$

$$Dew = \frac{234.18 \times \log_{10}(e_a) - 184.2}{8.204 - \log_{10}(e_a)} \quad \dots(3)$$

式 (1)~(3) で、 e_s は飽和水蒸気圧 (hPa)、 T は日平均気温 (°C)、 e_a は日平均水蒸気圧 (hPa)、 RH は相対湿度 (%), そして Dew は露点温度 (°C) である。

パラメータ設定に関して、SWAT モデルは米国で試験・収集されたデータベースを有しており、それを米国以外の地域で適用するには各パラメータ範囲の検証や調整が必要である¹⁷⁾。しかし本研究の水文モデル構築過程ではフィリピンのデータベースを有していないこと、および十分なデータベースを有していない地域への適用可能性を図るため、未知のパラメータについては SWAT モデルに格納されている米国ベースのパラメータデータを利用した。Table 3 および Table 4 にそれぞれ、パンパンガ川流域の土地被覆データ (Global Land Cover Product [2009], European Space Agency 発行) と土壌分布データ (Global Soil Regions Map [2005], Natural Resources Conservation Service Soils, United States Department of Agriculture 発行) を基に設定した SWAT モデル内のパラメータコードを示す。なお土壌パラメータは、SWAT モデル構築に使用した土壌データ内の土壌コードと、SWAT モデル内で提供されている USDA-NRCS の Soil Survey Geographic Database (SSURGO) 内で対応する土壌コードが一致するようにパラメータコードを選択した。

Table 3 Landcover ratio in the Pampanga River Basin, Philippines

Code	Description	Ratio (%)
AGRL	Agricultural Land-Generic	55.6
AGRR	Agricultural Land-Row Crops	33.4
FRST	Forest-mixed	9.2
URMD	Residential-Medium density	0.2
WATR	Water	1.6

Table 4 Soil distribution ratio in the Pampanga River Basin, Philippines

Soil type	Ratio (%)
Usterts	10.6
Uderts	3.6
Udults	22.4
Ustults	9.9
Ustalfs	3.3
Udalfs	4.3
Aquepts	35.8
Psamments	10.2

本研究では、SWAT モデルで出力した月別日平均河川流量のモデル計算値と、Department of Public Works and Highways (DPWH) より入手した河川流量の実測値の関係を基に再現性の検証を行った。流量観測地点はパンパンガ川本流の中流に位置する Valdefuente 地点 (Fig. 1, 北緯 15.53, 東経 120.96) を選択し、校正期間は流域内で目立った出水が起きておらず、観測データの欠損が少ない 2005~2006 年に設定した。月別日平均河川流量は、校正期間 2 年間における SWAT モデルによる日単位の流量出力値および日流量の実測値についてそれぞれ各月平均を求めることで計算した。モデル再現性の検証指標には既往研究で使用されている決定係数 (R^2), Nash-Sutcliffe 係数 (NSE), および Index of agreement (D) を用いた³²⁾。それぞれ、下記の式 (4)~(6) で示される³²⁾。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean, obs})(Y_i^{sim} - Y^{mean, sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean, obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y^{mean, sim})^2}} \right]^2 \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean, obs})^2} \right| \quad (5)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_i^{sim} - Y^{mean, obs}| + |Y_i^{obs} - Y^{mean, obs}|)^2} \quad (6)$$

式 (4)~(6) において、 Y_i^{obs} は評価対象期間における i 番目の観測値、 Y_i^{sim} は評価対象期間における i 番目のモデル計算値、 $Y^{mean, obs}$ は評価対象期間中の観測値の平均値、そして $Y^{mean, sim}$ は評価対象期間中のモデル計算値の平均値である。

R^2 および NSE によるモデル再現性の判定基準は Moriasi *et al.*³³⁾ によって、また D によるモデル再現性の判定基準は Krause *et al.*³⁴⁾ によって報告されている。いずれの指標もその値が 1.0 に近づくほどモデル再現性は良いとされている。 R^2 および D は 0.0 と 1.0 の間を取り、 NSE は 1.0 以下の値を取りうる。 NSE は、0.0~1.0 の値は再現性があり、負の値となった場合再現性は無いとされている。

2.3 対照流域の仮想設定による流域の水源涵養機能の検証

現在のフィリピンでは前述のダム建設のような構造物による水資源確保が中心となっているが、生態系への懸念や外国からの融資に頼ることで生じる問題も少なくない^{23,35)}。そのため構造物に頼らない水資源管理の検討も必要となる。そこで本研究はその端緒をつかむため、SWAT モデル上の Land Use Update 機能を

用いて土地被覆割合を変化させ仮想の対照流域を設定した。ここでは特にパンパンガ川流域内の農地 (AGRL) と森林 (FRST) の割合変化が河川流量へどのような影響を与えるか分析することで、洪水や渇水緩和といった流域の水源涵養機能²⁰⁾のポテンシャルを検証した。

土地被覆割合の設定条件を **Table 5** に示す。Scenario 1~3 は、農業などの1次産業需要がこのまま高まり、農地が拡大する代わりに現在分布している森林が縮小する設定である。Scenario 1 はパンパンガ川流域内に存在する森林の10%が、Scenario 2 は森林の50%が農地に置き換わる。そしてScenario 3 は流域内の全て (100%) の森林が農地の置き換わることで、流域内から森林が完全に無くなった場合を仮定している。一方、Scenario 4~6 は森林の水源涵養機能に期待し、森林を拡大 (回復) させる代わりに現在分布している農地を縮小させる設定である。Scenario 4 はパンパンガ川流域内の農地の10%が、Scenario 5 は50%が森林に置き換わる。またScenario 6 は流域内の全て (100%) の農地が森林の置き換わることを仮定している。

以上6パターンの設定条件により、流域内の土地被

覆変化による流量変化についてSWATモデルを用いて計算する。特に流域内の森林が完全に消失するScenario 4 と流域内の農地が完全に置き換わるScenario 6における結果は、対照流域として流域の水源涵養機能のポテンシャルを評価できる。ただしLand Use Update機能上での土地被覆の変化は拡大・縮小する土地被覆が同時に存在する小流域のみにて起こる³⁶⁾。これらの小流域では、対象となる土地被覆に係るHRUsの初期の面積比率とユーザーが設定した土地被覆変化割合を基に新たなHRUsが設定され、入力ファイルが作成される³⁷⁾。流量変化を検証する地点はパンパンガ川最下流部とした。シミュレーション期間は2007~2013年とし、7年間の月別日平均河川流量計算値の平均をとって土地被覆割合の変化による影響を検証した。

3. 結果と考察

3.1 SWATモデル構築結果

Fig. 3 に Valdefuente 地点における校正後の月別日平均河川流量 (2005~2006年) と実測値との比較を示す。モデルの再現性の検証指標として採用した R^2 , NSE , および D の値はそれぞれ0.65, 0.19, 0.84となり、 R^2 および D の値は既往文献³²⁻³⁴⁾における“Satisfactory” (十分) なモデル再現性を示す判定基準0.5以上を満たしている。一方で NSE の値は再現性のある結果となっているものの、十分な再現性を示す基準より低い値を示した。 NSE の値が低くなったのは、校正期間を通してモデル計算値が実測値の傾向 (季節変化) は捉えているが、各月の計算値と観測値の誤差が大きいことが原因となっている。実際に**Fig. 3**の結果からは計算値が実測値を上回る月が多く、

Table 5 Landcover change scenarios set in this research

Scenario code	Expanding landcover	Shrinking landcover	Rate of change (%)
1			10
2	AGRL	FRST	50
3			100
4			10
5	FRST	AGRL	50
6			100

(AGRL means the Agricultural Land-Generic and FRST means the Forest-mixed, as the SWAT landcover code shown in **Table 3**)

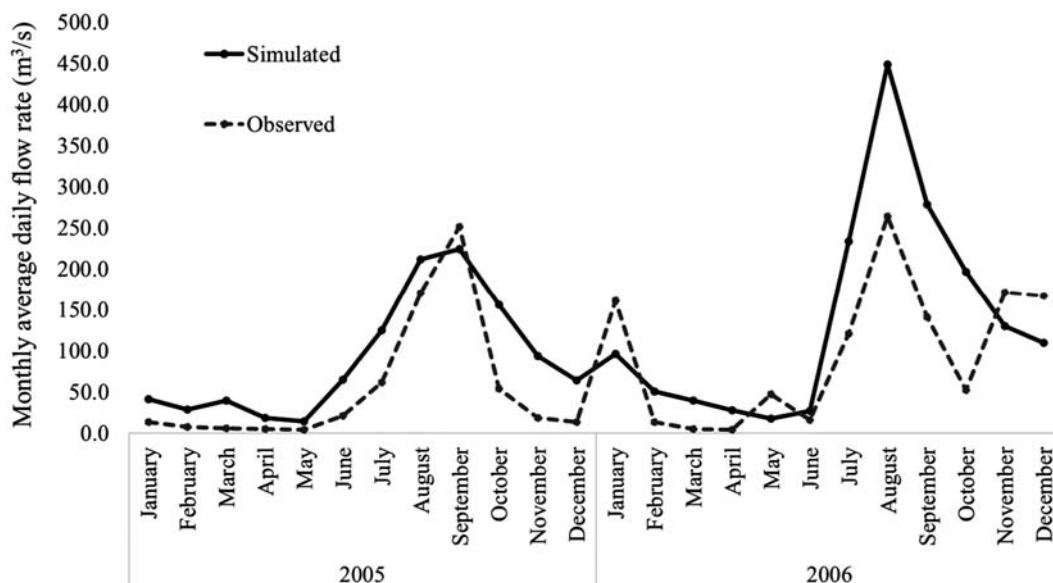


Fig. 3 Simulated and observed monthly average daily flow rate at the Valdefuente observation point

対象年によって雨季（6～11月）の再現性が大幅に異なることがわかる。構築した SWAT モデルは引き続き計算精度の向上は必要であるものの、いずれの指標においても再現性があるという判断基準は満たしているため、本研究では 3.2 の解析においても使用することとする。

雨季の河川流量は土地被覆、土壌、および傾斜の組み合わせである HRUs の変化の影響を受ける。特に本研究では米国ベースのパラメータデータを使用しているため、モデル構築、校正に必要で HRUs に関連する現地データの収集と整備、および入力値はパンパンガ川流域における SWAT モデルの再現性を向上させる上で引き続き重要な課題の一つである。特に東南アジアの流域においては、土壌貯水・含水量（浸透、蒸発等）や植生による貯留・遮断量に関わる SWAT モデルパラメータが水文計算に与える影響が大きいことが明らかとなっている¹⁷⁾。そのため、パンパンガ川流域においてもこれらのパラメータを重点的に検証する必要がある。また本研究でモデル校正に用いた DPWH の流量観測データは欠損値も多く、さらにデータを提供していた政府の管理ポータルは 2021 年 5 月現在閉鎖している。このように政府系機関によって管理されているデータであってもアクセスできない状況が生じることがあり、データ収集だけでなくその後の管理体制の安定化も課題である。

3.2 流域の水源涵養機能検証

Fig. 4 に Scenario 1～6 の条件下で計算した月別日平均河川流量の変化率の結果を示す。ここで Baseline scenario とは土地被覆割合変化前の計算結果を示し、各シナリオの結果はこの Baseline scenario に対する

河川流量の変化率を示している。SWAT モデルの構築結果（3.1 節）より、現状モデル計算値は全体の流量を過大評価する傾向がある。そのため、Baseline scenario のシミュレーション期間（2007～2013 年）においても流量計算値は高く出力されている可能性が高い。そこで本節では各 Scenario の評価結果を流量の変化率で表示することとする。

農地の拡大と森林の縮小を仮定した Scenario 1～3 は、現在流域の 9.2% を占める森林が農地に置き換わっていくことを意味している。乾季（12～5 月）の月別の日平均河川流量の変化率は、Scenario 1～3 のいずれにおいても $-0.2\sim 0.6\%$ の範囲となっている。一方、雨季の河川流量の変化率は Scenario 1 で $0.1\sim 0.2\%$ 、Scenario 2 では $0.5\sim 1.0\%$ 、そして Scenario 3 では $0.8\sim 2.2\%$ と徐々に増加している。この結果により、農地の拡大と森林の縮小によって雨季の流量が増加し、乾季の流量変化は雨季に比べ小さい傾向があることがわかる。農業が盛んであるフィリピンの現状を考慮すると、Scenario 1～3 のようにパンパンガ川流域で農地が広がる可能性がある。その際、土地利用転換（農地拡大）とともに乾季の河川流量の変化が見られないのであれば、今後も灌漑用水の不足が生じることも示唆している。

現在流域の土地被覆の 55.6% を占める農地が森林に置き換わっていく Scenario 4～6 では、乾季の流量変化率（ $-5.0\sim 0.4\%$ ）に比べて雨季の流量変化率（ $-9.2\sim 0.0\%$ ）が大きい。これらの結果より、Scenario 4 のように農地面積の 10% 程度の森林の拡大（回復）によって雨季の流量を減らすことは可能であり、転換割合が増えるほどその効果は高いことがわかる。これより、パンパンガ川流域内の森林に一定の

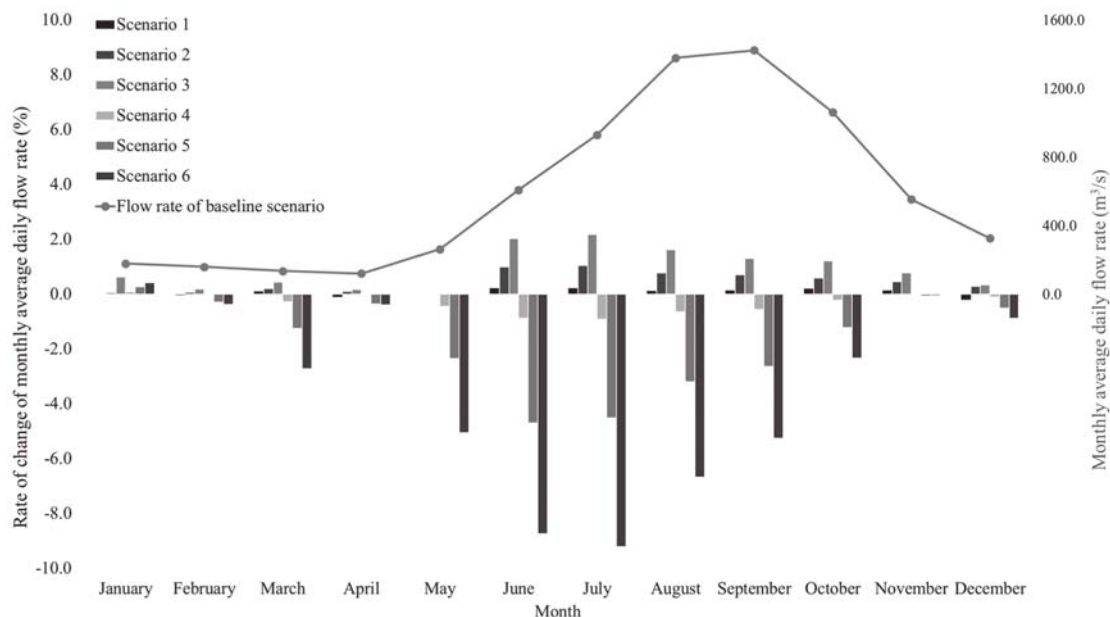


Fig. 4 Percent changes in monthly average daily flow rate from 2007 to 2013 under landcover change scenarios

水源涵養機能（洪水緩和）があることが明らかとなった。過度な転換は一方で乾季の流量減少を招くため農業生産とのバランスも考慮する必要があるため、今後流域内の森林の割合とその分布を検討することによって洪水緩和機能を最適化することが重要である。一方で乾季の流量増加は見られないことから、パンパンガ川流域における森林拡大・回復による渇水緩和は見込めない可能性がある。

以上の結果より、パンパンガ川流域において森林の水源涵養機能による流量調整の効果は水資源管理方法の一つの選択肢として考えることができる。しかしいずれの条件下でも乾季の流量増加はなく、渇水緩和の機能は現時点では期待できない。そのため乾季の水利用のための雨季の貯水といった季節間の融通なども水資源管理方法として検討する必要がある。SWAT モデルは HRUs によって流出機構が決まり、今後土地被覆や土壌のパラメータ調整により流量変化の感度も変動するため、継続して検討が必要である。

4. おわりに

本研究では、SWAT モデルをパンパンガ川流域へ適用して水文モデルの構築を行い、対照流域を仮想設定し流量変化をシミュレーションすることで流域の水源涵養機能のポテンシャルを検証した。現地データの少ないフィリピンの河川流域において、米国のパラメータデータベースを基に SWAT モデルを構築し、粗い時間解像度ではあるものの月別河川流量の季節的な流量変化に関しては十分な再現性が確認できた。また、パンパンガ川流域においては特に森林の拡大（回復）が雨季の洪水緩和へ効果がある可能性を確認した。

一方、本研究で構築した SWAT モデルは河川流量を過大評価する傾向があり、モデル再現性と計算時間解像度の向上は課題として残っている。本研究で SWAT モデル構築に使用した全球データは無償利用が可能であり、これらのデータを利用しながら現地データの蓄積とともにデータを置き換えていく必要がある。また本研究のモデル校正期間は、流量データが比較的安定し観測データの欠損が少ない期間に設定しているが、シナリオ計算期間の流況は検証していない。そのため今後は、降水量変化とともに出水の有無等を判定し校正・計算対象期間を設定する必要がある。

本研究のように、構築した水文モデルは環境変化に対するリスク評価だけでなく、流域の持つ様々なポテンシャル評価や流域の特性解析へ活用することができる。そのため今後解析を進め、本研究で明らかとなった森林の水源涵養機能の他にパンパンガ川流域の水資源管理へ有効な特性を明らかにし、より効果的なシナリオを構築していく予定である。

謝辞

本研究は公益財団法人大林財団より助成を受け、そして株式会社リバネス第47回リバネス研究費を活用し実施した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) J. Gaillard, M. R. M. Pangilinan, J. R. Cadag and V. L. Masson : Living with Increasing Floods: Insights from a Rural Philippine Community, Disaster Prevention and Management, Vol. 17, No. 3, pp. 383-395 (2008)
- 2) L. L. Toda, J. C. E. Yokingco, E. C. Paringit and R. D. Lasco : A LiDAR-based Flood Modelling Approach for Mapping Rice Cultivation Areas in Apalit, Pampanga, Applied Geography, Vol. 80, pp. 34-47 (2017)
- 3) C. Yap and A. Calonzo : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-03-18/worst-water-crisis-in-decade-hits-philippine-capital-here-s-why> (2021/5/24 最終アクセス)
- 4) H. Lee, J. Son, D. Joo, J. Ha, S. Yun, C. Lim and W. Lee : Sustainable Water Security Based on the SDG Framework: A Case Study of the 2019 Metro Manila Water Crisis, Sustainability, Vol. 12, 6860 (2020)
- 5) 日本経済新聞 : <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO42558160W9A310C1EAF000/> (2021/5/24 最終アクセス)
- 6) P. A. Jaranilla-Sanchez, T. Koike, C. T. Nyunt, M. Rasmy, I. Hasegawa, A. Matsumura and D. Ogawara : Hydrological Impacts of a Changing Climate on Floods and Droughts in Philippine River Basins, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 69, No. 4, pp. I_13-I_18 (2013)
- 7) CNN Philippines : <https://www.cnn.ph/news/2019/6/19/manila-water-maynilad-service-interruptions.html> (2021/5/6 最終アクセス)
- 8) P. A. Jaranilla-Sanchez, L. Wang and T. Koike : Modeling the hydrologic responses of the Pampanga River basin, Philippines: A quantitative approach for identifying droughts, Water Resources Research, Vol. 47, W03514 (2011)
- 9) J. C. Reganit : <https://www.pna.gov.ph/articles/1085789> (2021/5/15 最終アクセス)
- 10) W. Boughton and O. Droop : Continuous Simulation for Design Flood Estimation-A Review, Environmental Modeling & Software, Vol. 18, pp. 309-318 (2003)
- 11) M. L. Tan, P. W. Gassman, R. Srinivasan, J. G. Arnold and X. Yang : A Review of SWAT Studies in Southeast Asia: Applications, Challenges and Future Directions, Water, Vol. 11, No. 5, 914 (2019)
- 12) L. K. M. Palao, M. M. Dorado, K. P. A. Anit and R. D. Lasco : Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to Assess Material Transfer in the Layawan Watershed, Mindanao, Philippines and Its Implications on Payment for Ecosystem Services, Journal of Sustainable Development, Vol. 6, No. 6, pp. 73-88 (2013)
- 13) C. G. K. Boongaling, D. V. Faustino-Eslava and F. P. Lansigan : Modeling Land Use Change Impacts on Hydrology and the Use of Landscape Metrics as Tools for Watershed Management: The Case of an Ungauged Catchment in the Philippines, Land Use Policy, Vol. 72, pp. 116-128 (2018)
- 14) 加藤亮, 渡邊裕純, J. Boulange, 江口定夫, 坂口敦, 宗村広昭 : SWAT モデルの水田を含む流域への適用の問題点と改善

- に向けて, 農業農村工学会誌, Vol. 81, No. 12, pp. 983-987 (2013)
- 15) E. Lapong and M. Fujihara: Water Resources in the Philippines, An Overview of its Uses, Management, Problems and Prospects, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 57-67 (2008)
 - 16) M. Kim, L. Boithias, K. H. Cho, N. Silvera, C. Thammahacksa, K. Latsachack, E. Rochelle-Newall, O. Sengtaheuanghong, A. Pierret, Y. A. Pachepsky and O. Ribolzi: Hydrological Modeling of Fecal Indicator Bacteria in a Tropical Mountain Catchment, *Water Research*, Vol. 119, pp. 102-113 (2017)
 - 17) T. Kondo, N. Sakai, T. Yazawa and Y. Shimizu: Verifying the applicability of SWAT to simulate fecal contamination for watershed management of Selangor River, Malaysia, *Science of the Total Environment*, Vol. 774, 145075 (2021)
 - 18) M. G. A. S. Arceo, R. V. O. Cruz, C. L. Tiburan Jr., J. B. Balatibat and N. R. Alibuyog: Modeling the Hydrologic Responses to Land Cover and Climate Changes of Selected Watersheds in the Philippines Using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model, *DLSU Business & Economics Review*, Vol. 28, pp. 84-101 (2018)
 - 19) T. D. Reyes Jr.: Application of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model to Predict Streamflow and Sediment Yield in Wahig-Inabanga Watershed, Bohol, Philippines, *International Journal of Environmental and Rural Development*, Vol. 8, No. 1, pp. 104-110 (2017)
 - 20) 蔵治光一郎: 森林生態系の水涵養機能への社会の期待, *水利科学誌*, Vol. 56, No. 1, pp. 100-106 (2012)
 - 21) M. G. Catindig-Reyes: Governance Crisis in Water Services in the Philippines: A Need for Rethinking and Reframing Development Policies in the Country, *Journal of Human Ecology*, Vol. 8, No. 1, pp. 39-49 (2019)
 - 22) 日本貿易振興機構: <https://www.jetro.go.jp/biznews/2020/02/047da1b12ffe51e6.html> (2021/5/24 最終アクセス)
 - 23) 共同通信グループ NNA ASIA アジア経済ニュース: <https://www.nna.jp/news/show/1995596> (2021/5/20 最終アクセス)
 - 24) Manila Bulletin: <https://mb.com.ph/2020/11/17/kaliwa-dam-feared-to-worsen-flooding-in-metro-manila-1/> (2021/5/24 最終アクセス)
 - 25) Manila Bulletin: <https://mb.com.ph/2021/01/18/mwss-raises-hope-for-kaliwa-dams-construction/> (2021/5/24 最終アクセス)
 - 26) M. M. Kalcic, I. Chaubey and J. Frankenberger: Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrologic Response Units (HRUs) by Field Boundaries, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 69-80 (2015)
 - 27) S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams: Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, Texas Water Resources Institute Technical Report, No. 406 (2011)
 - 28) 村上泰啓, 水垣滋, 三島啓雄: SWAT モデルを用いた河川流域の物質流出特性評価について (第 2 報), 平成 22 年度技術研究発表会 (2011)
 - 29) U. Ghimire, T. Akhtar, N. Shrestha and P. Daggupati: Development of Asia Pacific Weather Statistics (APWS) Dataset for Use in Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Simulation, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2019-178> (2019)
 - 30) R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith: Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome (1998)
 - 31) E. Yehayis: Predicting Runoff and Sediment Yield Using SWAT Model for Ija Galma Waqo Spate Irrigation Project, Master's thesis, Haramaya University (2010)
 - 32) T. Yazawa, S. Kim, K. Sato and Y. Shimizu: Estimation of Design Flood Criteria toward Integrated Watershed Management in the Johor River Watershed, Malaysia, *Journal of EICA*, Vol. 24, No. 2/3, pp. 22-31 (2019)
 - 33) D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith: Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900 (2007)
 - 34) P. Krause, D. P. Boyle and F. Base: Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment, *Advances in Geosciences*, Vol. 5, pp. 89-97 (2005)
 - 35) M. B. Miraflor: <https://mb.com.ph/2020/11/17/kaliwa-dam-feared-to-worsen-flooding-in-metro-manila-1/> (2021/5/20 最終アクセス)
 - 36) H. Zhang, B. Wang, D. L. Liu, M. Zhang, L. M. Leslie and Q. Yu: Using an Improved SWAT Model to Simulate Hydrological Responses to Land Use Change: A Case Study of a Catchment in Tropical Australia, *Journal of Hydrology*, Vol. 585, 124822 (2020)
 - 37) D. Lee, J. H. Han, M. J. Park, B. A. Engel, J. Kim, K. J. Lim and W. S. Jang: Development of Advanced Web-based SWAT LUC System considering Yearly Land Use Changes and Recession Curve Characteristics, *Ecological Engineering*, Vol. 128, pp. 39-47 (2019)

Applicability Evaluation of the SWAT Model in the Pampanga River Basin, Philippines

Taishi Yazawa^{1,2)†} and Takayuki Honda¹⁾

1) College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

2) Master's Program in Environmental Engineering, Vietnam Japan University, Vietnam National University, Hanoi

† Correspondence should be addressed to Taishi Yazawa :
(College of Science and Engineering, Ritsumeikan University
E-mail : yazawa-t@fc.ritsumei.ac.jp)

Abstract

This research investigates the water recharge function by applying the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model to the Pampanga River Basin, Philippines and setting land cover change scenarios as control areas. The global data and the parameter database available in the United States were used in the SWAT application process. The constructed SWAT model simulated decreases, from -9.2 to 0.0 percent changes, in the monthly average daily flow rate during the rainy season under the reforestation scenarios. Thus, it was revealed that the forest in the basin has flood mitigation potential. Although the performance of the SWAT model needs to be improved with a further collection of local data, it enables us to reveal the unique characteristics and potential of the basin so that effective water resources management could be designed.

Key words : Pampanga River basin, SWAT, water resources management, land cover change, water recharge function