

〈論文〉

タイ王国・ヨム川流域における統合的水資源管理へ向けた
水需給バランスと渇水リスクの評価岡 林 あゆみ¹⁾, 矢 澤 大 志²⁾, 橋 本 征 二²⁾, 佐 藤 圭 輔²⁾¹⁾立命館大学大学院 理工学研究科

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1 E-mail: rv0058pk@ed.ritsumei.ac.jp)

²⁾立命館大学 理工学部

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1)

概 要

本研究では、近年渇水被害の相次ぐタイ王国のヨム川流域における統合的水資源管理へ向け、複数の視点から時空間的な渇水リスクの評価を行った。分布型流域モデル Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF) を用いて流量と実蒸発散量を計算し、小流域ごとに水需給バランス(社会経済的渇水)と渇水リスク(水文の渇水)を求めた。その結果、水需給バランスが不安定な地域は流域東側に、渇水リスクの高い地域は流域下流部東側に集中していることを確認し、異なる種類のリスク分布を把握し、統合的水資源管理へ向けた効果的なシナリオの検討における有用な知見を得た。

キーワード：統合的水資源管理, HSPF, ヨム川流域, 水ストレス, 渇水リスク

原稿受付 2020.6.10 原稿受理 2020.9.9

EICA: 25(2・3) 121-129

1. は じ め に

現在、世界では渇水・水不足に脅かされている国や地域が存在する。そのような地域では、今後の経済発展や人口の増加等によってさらに必要とされる水需要量を賄うことは困難であることや、水資源の偏在化が進行することが予測されている。急激な人口増加などに伴う水需要増加により、利用可能な水資源量の限界に達してしまった国や地域、水資源が偏在化した地域では深刻な水資源問題を抱えることとなる。このような地域での水不足は、日本で議論されるダム熟练操作などで対処可能な社会経済的な水不足とは本質的に異なっている¹⁾。特に東南アジア地域では、人口増加や工業発展、灌漑農業などの拡大に伴って水需要が増加し、さらに深刻な水不足が広範の地域にわたって起こることが懸念されている²⁾。そこで統合的水資源管理³⁾のように、これらの水不足問題を抱える地域に対して経済的・社会的な福祉の最大化を図りながら、生態系の持続可能性を確保する開発および管理を促進し適切な施策を講じることが重要になる。

タイ王国はモンスーンにより雨季と乾季が存在する地域であり、毎年のように洪水や渇水に見舞われている。国内を縦断するチャオプラヤ川では2011年に大洪水が発生し、多くの工業地帯が被害を受けた一方⁴⁾、2019年には1979年以来、過去最悪の渇水に見舞われ工業地域における渇水被害の他に、食品製造業では果物、野菜などの不足による原材料費の高騰も懸念され

ていた⁵⁾。そのため流域特性や水文特性に着目した効率的な水資源管理を行い、水の恵みを適切に受けられる環境をつくることが望まれている。チャオプラヤ川流域を構成する主要河川の1つであるヨム川流域は、農業が盛んである一方で貯留施設等による水資源管理に頼っていない。さらに同じく農業が盛んな他支流と比較して干ばつが頻発しており、統合的水資源管理の必要性が述べられている⁶⁾。そのため、ヨム川流域のようにダム等の貯留施設を含まない東南アジア地域の農地利用の多い流域における、水管理のロールモデルの構築が求められる。また、現在ヨム川流域を対象とした洪水に着目した災害リスク評価は行われているが⁷⁾、渇水や水資源管理に着目した取り組みは少ない。渇水については米国の National Drought Mitigation Center⁸⁾でも記載されているように、世界的に4種の渇水要因 (Meteorological, Agricultural, Hydrological, および Socioeconomic) について長年議論され様々な指標が開発されているが、これらは別々に研究、評価されることが多い。しかし、例えば“Hydrological”には渇水ではない(流域内の流量や水位は十分である)が、“Socioeconomic”には渇水である(必要な水需要量を満たせない、水不足)、といった事象が生じる地域があり、このような事象は流域内の自然環境の要因だけではなく、人間活動(生活的要因)も原因となって引き起こされる。そのため、複数の視点から渇水を統合的に評価して、今後の効率的な水資源管理を行うことが期待されている。

そこで本研究ではタイ王国・ヨム川流域を対象地とし、合理的な統合的水資源管理へ向けた時空間的な渇水・水不足リスクの評価を行うために、流域内の小流域ごとにおける地形特性や水文特性を考慮することが可能な分布型流域モデルを構築する。そして、水需要の定量を基に社会経済的渇水を、河川流量を基に水文的水需給を把握する。この両面からリスクの評価を行い、それぞれの渇水に影響する流域内特性を明らかにする。また、本論では複数の視点で渇水の評価をすることにより、将来的に求められる統合評価への知見を得ることを目的とする。

2. 研究対象流域および研究方法

2.1 研究対象流域

タイ王国は東南アジアの中心に位置し、熱帯性モンスーン気候の影響を受ける。気候は5月中旬から9月までは南西季節風により雨季となり、11月から4月までは北西季節風により乾季となる。本研究の対象河川であるヨム川は国内南北を縦断するチャオプラヤ川の主要な支川の1つであり、国内北部の山間部に流域が広がる (Fig. 1)。Table 1 にヨム川流域の基本情報

Table 1 Information of the Yom River Basin and its mainstream.

河川長 (km)	735	
最大標高 (m)	300	
流域面積 (km ²)	25,180	
流域人口 (人)	2,289,595	
土地利用割合 (%)	森林	46
	農地	51
	草地	2
	水域	1

を記す。ヨム川流域土地利用の46%を占めている森林のほとんどは上流部に、51%を占める農地のほとんどは下流部に分布しており、流域内にはダム等の貯留施設が建造されていない。そのため2019年にヨム川流域内で干ばつが生じた際、ヨム川内の水位が急速に低下して干上がったことにより、人々が河川を歩いて渡りることができる状態となった。加えて地下水位も下がったことで、農家が所有するウォーターポンプでは水を吸い上げられずさらに井戸を深く掘り沈める必要があった。また、水の供給が不足している地域に対しては配水用車両で地区と地域レベルで対応を行った⁹⁾。

チャオプラヤ川流域 (ヨム川流域外) に存在する大規模ダムは発電や灌漑、洪水調節に用いられているが、それらの目的において渇水を考慮した管理が明確になされていない¹⁰⁾。そのため、ヨム川流域外からの越境給水を見込むことは困難である。またヨム川流域では、渇水と水不足による農作物への影響が危険視され、土地利用変化を考慮した時空間的な水資源分布やリスク評価を行った上での統合的な水資源管理が必要とされている¹¹⁾。そのため、河川貯留量を定量化し河川干ばつ度を求め、乾季に使用する水を雨季中に貯蔵することを想定したシナリオ解析や¹¹⁾、1990年以降の都市部増加など、土地利用変化による水文学的影響も考慮した研究が進められている¹²⁾。

2.2 分布型流域モデルの構築

本研究では、アメリカ合衆国環境保護庁 (US EPA) が開発した Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF)^{13,14)} をヨム川流域へ適用し、分

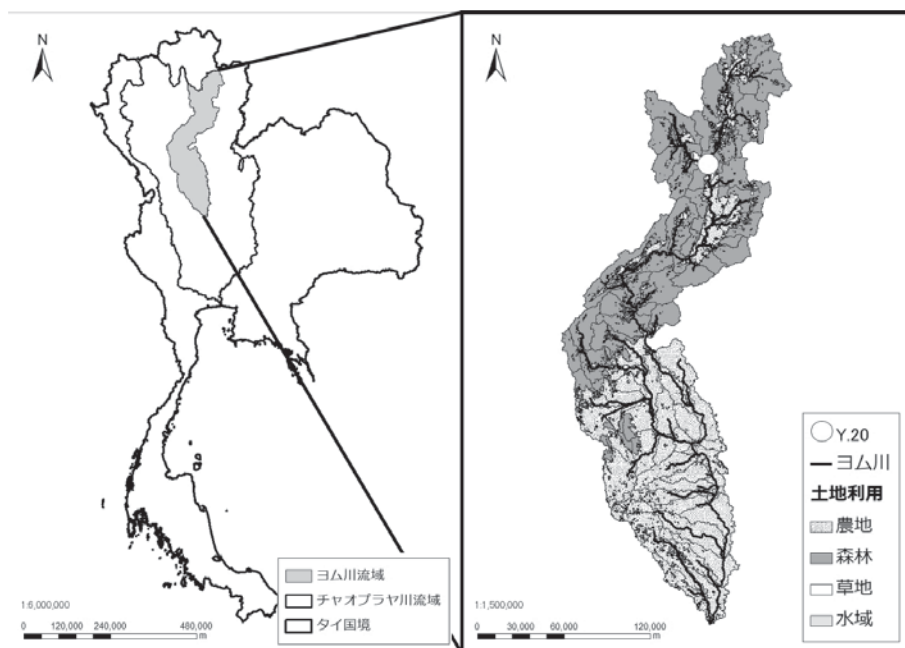


Fig. 1 Location and land use of the Yom River Basin, Thailand.

Table 2 Datasets used in this research.

データ名	出典	期間 (年)
標高	SRTM-1	2000
土地利用	Globcover	2009
気温	Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	2000-2014
日流量	Royal Irrigation Department (RID)	2000-2014
流域人口	LandScan	2016
用水別 水利用量	The Atlas of Water : Mapping the World's Most Critical Resource	2016

布型流域モデルの構築を行った。HSPF は時系列の気象や土地利用状況に関するパラメータに基づき、流域における水文と様々な物質動態を再現可能であり、モデル内では対象流域を透水性の陸域「PERLND (PerVIOUS Land Segment)」, 不浸透性の陸域「IMPLND (Impervious Land Segment)」および完全混合状態を仮定した水域「RCHRES (Reach and Reservoir)」に大別している。各セグメントにおいて流出や浸透、蒸発等に関わるパラメータを設定し、外部データを入力することで水量や水質計算を行っている¹⁵⁻¹⁷⁾。

Table 2 に、モデル構築の際に用いたヨム川の流域環境情報およびその出典を示す。ヨム川流域における流域特性や水文特性を考慮したモデル構築を行うため、気象時系列データ（降水量や可能蒸発散量等）と空間情報データ（流域、河川、土地利用等）を入力した。土地利用は森林、農地、草地、および水域の4種類に分類した上で、流域を77小流域に分割して土地利用ごとにパラメータを設定した。なおヨム川流域内には土地利用データ上、都市部が存在しないため不浸透性陸域 (IMPLND) は設定していない。また、モデル内では取水や放出等の人為的な水の流れは反映されていない。本研究では、後述の水需給バランスと渇水リスクの評価に用いる日流量と日実蒸発散量を、2000年1月1日から2014年7月31日を対象期間としてHSPFモデルを用いて計算した。

また、本研究ではモデル再現性の確認のため決定係数 (R^2 値) と Nash-Sutcliffe 係数 (NSE, 式(1)) を求めた¹⁸⁾。NSE とは測定されたデータ分散と残差分散との分散比に基づく指標であり、1.0 に近いほど再現性が高いとされている。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (1)$$

式(1)において Y_i^{obs} は i 日目の実測値、 Y_i^{sim} は i 日目のモデル値、 Y_i^{mean} は実測値の平均値、そして n は合計計算日数 (対象期間) を表す。

本研究では、王立灌漑局 (RID) より入手可能であり、かつヨム川本川上に位置する上流の Y. 20 地点 (**Fig. 1**, 北緯 18.59624, 東経 100.1498) における

2013年4月1日から2014年3月31日の河川流量データと、同地点・同期間における河川流量のモデル計算値を比較した。

2.3 水需給バランスの評価

本研究における水需給バランス (社会経済的渇水) の評価では、水利用量と水賦存量の空間分布に着目する水ストレス (水需給がひっ迫している程度を表す指標) を用いた。国土交通省¹⁹⁾によると、2050年には人口や灌漑用水の増加により深刻な水不足に見舞われる世界人口は39億人に達すると推計されている。そして、この報告では人口1人当たりの最大利用可能水資源量が示されており、都市など限定的な空間に人が集中すると地域的な水ストレスが高まると予測されている。そのため、水ストレスは国ごとではなく流域や都市ごとに算出することで、その地域特有の問題を発見し、水資源に対して脆弱な地域におけるより効率的な水資源対策を講じるべきとされている²⁰⁾。また林ら (2014)²¹⁾ によれば、アラビア半島や北アフリカ、中国北東部や南アジア、北アメリカ南西部等では水ストレスが高いと評価されている。上述の地域には農地面積が多く作物の輸出を行う地域や、港湾整備・開発を行う地域、人口が集中しており商業が盛んな地域等、水不足が発生した際に世界的に経済影響を受けるリスクの高い地域が含まれている。そのため水需給バランスの変化とその要因を明らかにすることは、特に水ストレスが高い地域の今後の水利用や管理、ひいては持続的発展のために重要になるとされており、水ストレスを水需給バランスの評価指標として設定することの有用性を示している²¹⁾。

本研究では2010年におけるヨム川流域の水ストレスを下記の式(2)~(4)に基づいて小流域ごとに算出した。式(2)では農業用水量、生活用水量、および工業用水量をもとにヨム川小流域内の水利用量を設定した。これらの原単位 (m^3 /人/年) は M. Black (2016)²²⁾ の国別 Water Use を参照し、農業用水は $784 (m^3$ /人/年)、生活用水は $42 (m^3$ /人/年)、そして工業用水は $41 (m^3$ /人/年)とした。なお本研究で使用した用水別水利用量の最小単位は国別であるため、小流域ごとの原単位は同一のものを設定した。これらの仮定の結果、1人当たりの対象流域における年間水利用量は $867 (m^3$ /人/年) となる。この値と LandScan^{TM 23)} より入手可能な全世界の小流域人口を ArcGIS 上で対象小流域ごとに掛け合わせて水利用量の空間分布を計算した。また、式(3)では降水量と実蒸発散量のモデル計算値によって小流域ごとの水賦存量を求めた。そして、式(4)によって各小流域における水ストレス (W_i) を算出し、0.4以上は高いストレス状態、0.2から0.4は中程度のストレス状態、0.2未

満は低いストレス状態と設定した²⁴⁾。

$$U_i = (A + L + I) \times P_i \quad (2)$$

$$R_i = (r_i - E_i) \times S_i \times 10^3 \quad (3)$$

$$W_i = U_i / R_i \quad (4)$$

式(2)で、 U_i は水利用量($m^3/year$)、 A は農業用水量($m^3/人/year$)、 L は生活用水量($m^3/人/year$)、 I は工業用水量($m^3/人/year$)、そして P_i は小流域人口(人)を示している。また式(3)において R_i は水賦存量($m^3/year$)、 r_i は降水量($mm/year$)、 E_i は実蒸発散量($mm/year$)、そして S_i は小流域面積(km^2)である。

2.4 渇水リスクの評価

本研究における水文的渇水リスクの評価指標には、一度渇水に陥った際の平均継続期間を意味する渇水平均継続期間(日/回)を用いた。渇水リスクの評価には、渇水の「長さ」、「大きさ」、および「厳しさ」を評価することが重要であり、渇水の継続性や立ち直りの早さを表す指標を用いることでこれらを統合的に評価することが可能である²⁵⁾。渇水の「大きさ」に関しては、灌漑可能な水田面積を求めることで評価する²⁶⁾。渇水の「厳しさ」に関しては、渇水期間における水ストレスを算出することで評価する手法が考えられている。しかし、長期的な渇水リスク(農業被害や生態系への影響)に関連する「長さ」については、定量評価の事例が少ない。そのため本研究では渇水の「長さ」に着目し、渇水平均継続期間(日/回)の指標を用いることで、タイ王国を含む東南アジア地域でみられる雨季や乾季による季節的な水資源量の変動に対応しながら、渇水の発生のみならず継続期間の把握から脆弱

性の季節的な特徴を評価する。

渇水平均継続期間は、渇水基準値を下回る渇水イベント中の日数を合計した渇水合計日数(日)と、渇水イベントの回数を合計した渇水発生回数(回)を用いて式(5)より算出した。2.2で構築したHSPFモデルによる流量の計算値をもとに2000年1月1日から2014年7月31日を解析対象期間として渇水平均継続期間を求めた。モデル計算流量の流況曲線をもとに、低水流量 Q_{70} 、渇水流量 Q_{90} および Q_{95} の3種類の渇水基準値^{27,28)}を設定し、それぞれの基準値で対象期間における渇水イベントを抽出することで渇水リスクの高い小流域を明らかとした。なお Q_{70} を設定した場合が最も厳しい渇水基準値となる。渇水基準値は各小流域で流況曲線を作成した後、 Q_{70} は256日目、 Q_{90} は329日目、 Q_{95} は347日目にあたる流量を抽出して設定を行った。

$$D = \frac{d}{n} \quad (5)$$

式(5)において、 D は渇水平均継続期間(日/回)、 d は渇水合計日数(日)、そして n は渇水発生回数(回)を示す。

3. 研究結果

3.1 分布型流域モデルによる河川流量の再現性

Fig. 2にヨム川上流Y. 20地点における2013年4月1日から2014年3月31日の河川流量データと、同地点・同期間における河川流量のモデル計算値の比較結果を示す。実測値とモデル計算値の総流量の差は約3%であり、決定係数(R^2 値)が0.63、Nash-Sutcliffe

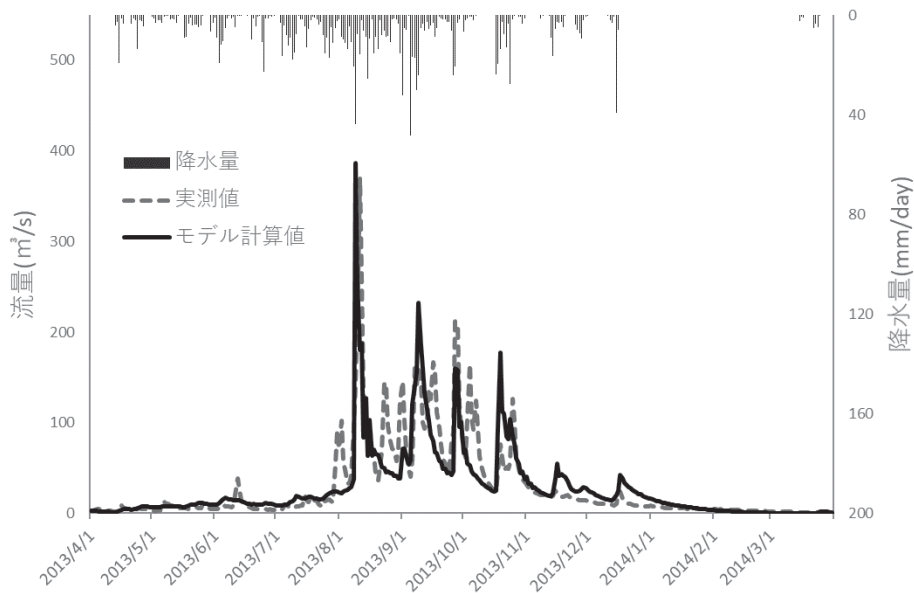


Fig. 2 Simulation results of daily flow rate at Y. 20 observation point (N18.59624, E100.1498) in the Yom River Basin from April 1, 2013 to March 31, 2014.

係数 (NSE) は 0.63 となったことから、推定された河川流量は一定の再現性を示す結果が得られた。また、実蒸発散量のモデル計算値についても文献値²⁹⁾との比較により、土地利用ごとの蒸発散量に関して良好な再現性が得られている。そのため、この推定結果を利用して本研究では水需給バランスや渇水リスク評価を行うこととした。なお本研究では用いた評価指標が年間の水需給バランス (水ストレス) と低水～渇水 (渇水平均継続期間) を対象とするため、地下層における水の消失、上層土壌の貯留量や中間流に関連するパラメータを調整することで、年間水収支の誤差を減らし決定係数と Nash-Sutcliffe 係数が良好な値をとるようモデル校正を行った。そのため出水時の表面流出といった短期的な事象の再現が不十分となる部分もあり、今後は評価対象に合わせて再現性を高める必要がある。

3.2 水ストレスの評価結果

Fig. 3 にヨム川流域の 2010 年における小流域ごとに計算された (a) 水賦存量, (b) 水利用量, および (c) 水ストレス分布を示す。Fig. 3(a) より、流域上流部での水賦存量が低い値を示している。水賦存量と小流域面積の間には強い正の相関 (相関係数が 0.74) がみられ、小流域面積の小ささが一つの要因となり水賦存量が少なくなっていると考えられる。式(3)より、他に水賦存量に影響を及ぼすものとして実蒸発散量や降水量が挙げられ、水賦存量と実蒸発散量の相関係数は 0.24 と弱い正の相関、水賦存量と降水量の相関係数は 0.51 と正の相関を示した。したがって、水賦存量における影響因子としては最も大きいものから小流域面積、降水量、そして実蒸発散量であることが明らかとなった。Fig. 3(b) からは、流域上流部での水利

用量が低い値を示していることがわかる。また、水利用量と農地、水利用量と森林との相関関係を確認すると、弱い正の相関と弱い負の相関を示した。これは流域上流部の土地利用の多くは森林であり、流域下流部に多く存在する農地と比較して水利用量が少ないことが要因である可能性がある。Fig. 3(c) より、高い水ストレス (0.4 以上) を示す地域はヨム川流域に 3 小流域存在しており (上流に 2 か所, 下流に 1 か所), これらは流域東側に集中している。また、0.2 から 0.4 の中程度のストレスを示した小流域は上流に 2 か所, 中流に 4 か所存在する。Table 3 に水ストレスと小流域ごとの面積, 人口, および小流域内の土地利用割合との相関係数を示す。水ストレスは小流域人口と正の相関、小流域内土地利用割合の中でも農地とは弱い正の相関がみられた。これは水賦存量と水利用量, どちらも農地が弱い正の相関を示しているためだと考えられる。また、Fig. 3(c) において水ストレスが 0.4 以上の小流域の人口は 9 万人以上の地域であり、水利用量とも関係する流域人口が水ストレスに大きく影響している要素であることが明らかである。また土地利用に着目すると、中程度以上 (0.2 以上) の水ストレ

Table 3 Correlation coefficient between water stress and subbasin characteristics (area, population, and land-use ratio) of the Yom River Basin.

	水ストレスとの相関係数
小流域面積	0.00
小流域人口	0.69
小流域内の土地利用割合	
農地割合	0.25
森林割合	-0.20
牧草地割合	-0.09
水域割合	-0.28

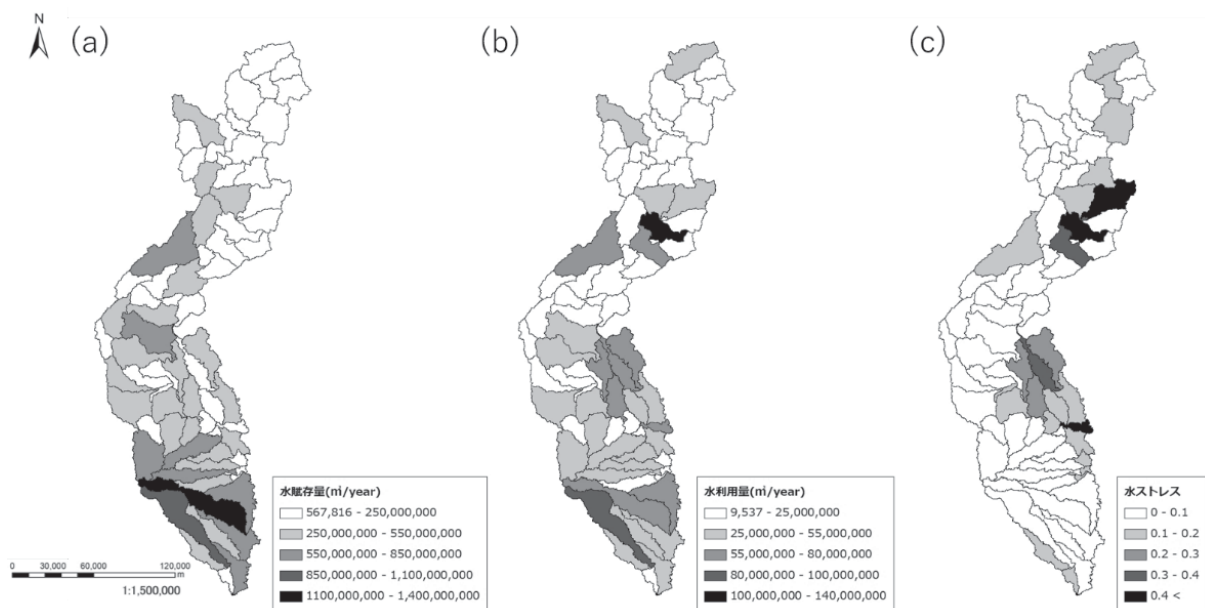


Fig. 3 Calculation results of (a) potential water resource, (b) water use, and (c) water stress in the Yom River Basin (2010).

スを示した小流域は農地の割合が多い。これは、タイ王国において農業用水が水の総利用量の90%程であることが原因と考えられる。

以上の結果より、水ストレスを計算することにより流域内の地域的・空間的な水需給バランス（社会経済的渇水リスク）を明らかにした。同時に水ストレスと小流域面積、小流域人口、および小流域内の土地利用割合との相関関係より、ヨム川流域の水ストレスは水利用量計算に用いている小流域人口と農地利用割合の要因が大きい。そのため、水需給バランスを考えるうえで水利用量の算出においては小流域ごとの人口当たりの原単位の設定や、将来的な人口分布などをより考慮することが必要である。さらに、農業用水が大半を占める本流域においては、人口だけではなく農地面積を踏まえた農業用水量の算定も求められる。水利用量が農地面積と比例していると仮定すると、農地が集中している流域下流部の水ストレス分布が変化する可能性がある。しかし、本研究のように利用可能性が高い全球人口データを用いた水ストレスの算出方法は、タイ王国の他にも流域情報が少ない地域で適用できる。そのため、水資源管理が実施されていないデータ僅少地域において水ストレスを算出し社会経済的渇水リスクを明らかにすることによって、行政や住民に対し水資源の現状を的確かつ理解しやすい形で共有し、水資源管理の重要性の認知を促すことが可能である。

3.3 渇水平均継続期間を用いた水文的渇水リスクの評価結果

Fig. 4 に2000年1月1日から2014年7月31日のヨム川流域における渇水基準値 Q_{70} 、 Q_{90} および Q_{95} に対する渇水平均継続期間の計算結果を示す。また、

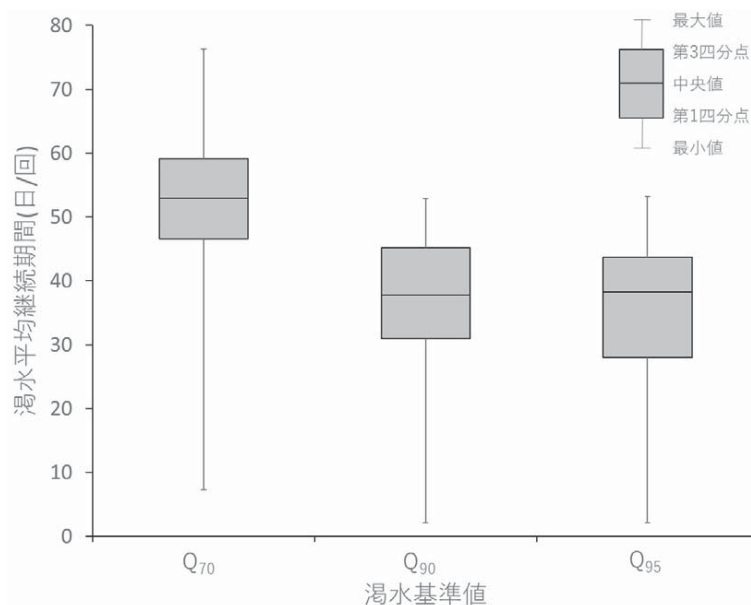


Fig. 4 Box plot of the average drought duration in the Yom River Basin from January 1, 2000 to July 31, 2014.

Fig. 5 には渇水基準値 (a) Q_{70} 、(b) Q_{90} および (c) Q_{95} に対して小流域ごとに求めた渇水平均継続期間の空間分布を示す。渇水基準を Q_{70} に設定した場合、渇水平均継続期間が47から59日の長いものが多く、30日未満を示した小流域はわずか1割だけであった。比較的長い継続期間の地域は流域東部に集中する結果となった。次に渇水基準を Q_{90} にすると渇水平均継続期間が50日以上を示した小流域数は6であった。また、2000年から2014年における渇水平均継続期間が30から39日である小流域は28、40から49日である小流域は29であった。どちらの期間も30小流域程度発生しているため、1年に平均2回は1か月以上の渇水に見舞われるリスクがある。実際にチャオプラヤ川流域内において2016年に発生した干ばつでは、4つの主要な灌漑用ダム（Bhumibol ダム、Sirikit ダム、Kwae Noi ダムおよび Pasak Jolasid ダム）の貯水量を一定以上に保つ為の放水制限が継続的に実施され、政府は農家に対して水の使用制限と稲作以外の穀物の栽培を行うように要請した記録が存在する³⁰⁾。

さらに渇水基準を Q_{95} にすると Q_{90} の結果と近い渇水発生頻度となった。これはモデル流量が乾季に0を示し、0が多く示された小流域において渇水基準値 Q_{95} と Q_{90} の値に差が生じなかったことが起因している。基準値が Q_{70} の場合の渇水平均継続期間と比較して、 Q_{95} の場合には渇水平均継続期間が50日以上を示した小流域は40か所以上減少し、渇水基準の厳しさが影響している。基準値が Q_{70} から Q_{95} と、渇水基準の厳しさが低水流量から渇水流量に下がると渇水平均継続期間が50以上の分布が変化し、それらはヨム川流域下流部東側に集中することが明らかとなった。

Table 4 に渇水平均継続期間と小流域ごとの面積、

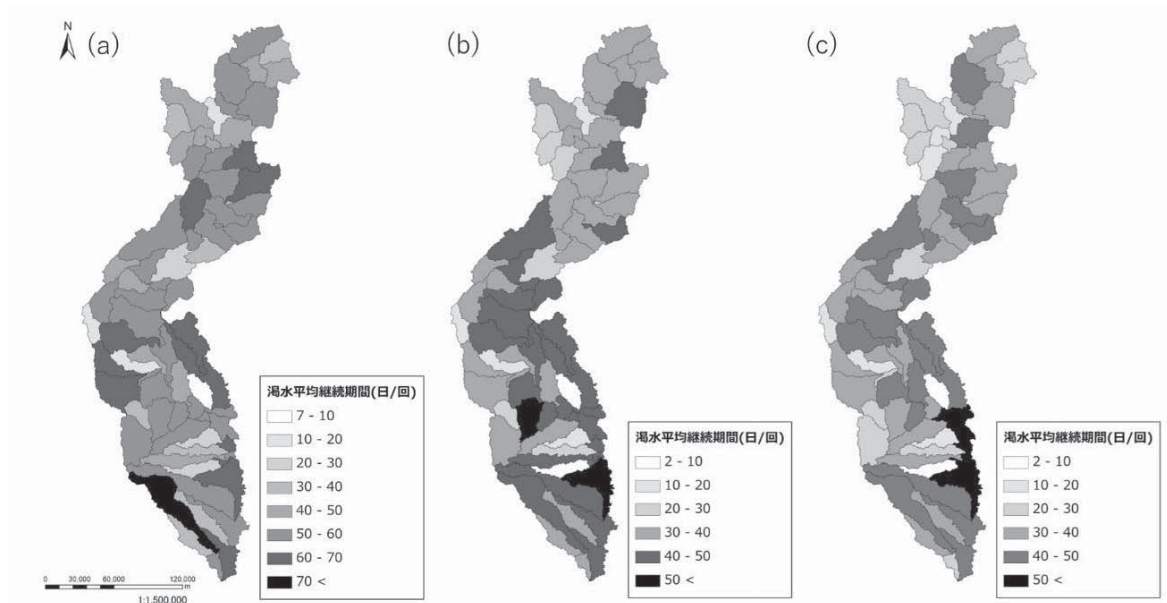


Fig. 5 Calculation results of the average drought duration for (a) Q_{70} threshold, (b) Q_{90} threshold, and (c) Q_{95} threshold in the Yom River Basin from January 1, 2000 to July 31, 2014.

Table 4 Correlation coefficient between the average drought duration (Q_{70} , Q_{90} , and Q_{95}) and subbasin characteristics (area, population, and land-use ratio) of the Yom River Basin.

	Q_{70} との 相関係数	Q_{90} との 相関係数	Q_{95} との 相関係数
小流域面積	0.30	0.20	0.17
小流域人口	0.25	0.31	0.37
小流域内の土地利用割合			
小流域内農地割合	0.03	0.10	0.16
小流域内森林割合	-0.06	-0.06	-0.08
小流域内牧草地割合	0.00	0.00	-0.13
小流域内水域割合	0.45	0.33	0.14

人口および小流域内の土地利用割合との相関係数を示す。渇水基準値が Q_{70} の場合には小流域面積と小流域人口、そして小流域内の水域割合が渇水平均継続期間と弱い正の相関を示した。これより小流域人口が多い場合は取水量が増え、河川流量が減少すると考えられる。そのため今回の水文モデルでは取水の考慮はなされていないが、取水による河川流量への影響は今後調査する必要がある。またタイ王国内の農地面積が国土の約 40% に相当する中で、灌漑システムが整備されている地域は農地の約 20% と低い現状であるため³¹⁾、多くの農業地域で低水あるいは渇水流量による直接的な利水影響が懸念される。渇水基準値が Q_{90} の場合にも Q_{70} の場合と同様に、小流域ごとの面積と人口、および小流域内の水域割合が渇水平均継続期間と弱い正の相関を示した。Fig. 5 で示された高い渇水リスクの地域は流域面積が大きく、乾季には干上がり（流量が 0 となる）、雨季のみに発生する河川である可能性があり、年間を通しての渇水リスク評価では極端に高い値を示したと考えられる。渇水基準値が Q_{95} の場合に渇水平均継続期間と弱い相関を示した項目は小流域人

口のみであった。小流域人口が少なく、渇水平均継続期間が短い小流域と隣接する小流域は渇水平均継続期間が長い傾向があるため、水資源を共有するシステムや貯留システムの整備や導入を検討するきっかけになりうる。システム検討の際には、小流域内で行われている産業や農業、生活環境の考慮が必要であるが、本研究で構築した分布型流域モデルは流域の再現を行うのと同時に土地利用・用水量割合の変化等を組み込んだシナリオ計算を行うことが可能であり、より効果的な施策の検討を可能にする。

本研究では、3.2 で求めた水ストレス・社会経済的渇水リスクの高い地域と、渇水平均継続期間の長い・水文学的渇水リスクの高い地域を明確にした。複数の視点で渇水の評価することにより、今後の効率的な水資源管理に向けて必要とされる渇水の統合評価において有益な知見を得た。今後は社会経済的・水文的渇水の両視点における高リスクな地域を明らかにし、シナリオ解析や統合的な水資源管理の検討を行う。

4. 結 論

本研究では、タイ王国のヨム川流域において分布型流域モデルを構築し、水需給バランスと渇水リスクの評価を行った。その結果を以下に記す。

- ① HSPF モデルをヨム川流域に適用し、分布型流域モデルの構築を行った。モデル構築に必要な時系列データや空間情報データを入力しキャリブレーションを行うことで、水収支に関して再現性の高いモデル構築を図った。これにより、対象流域における流域特性や水文特性を考慮した河川流量や実蒸発散量のシミュレーションが可能となった。

- ② 2010年におけるヨム川流域内の水ストレスは、流域東側3小流域が高い値を示した。上流から下流にかけて人口分布や土地利用に変化があり、それぞれが水需給に影響を及ぼすことが明らかとなった。特に農地が多い小流域では水ストレスが高くなる傾向にあるため、水需給バランス（社会経済的渇水）の議論には農地面積も考慮する必要がある。水資源管理が不十分な地域に対し水ストレス指標を用いることで、容易に社会経済的渇水リスクや水資源管理の重要性を認知できる。
- ③ 2000年1月1日から2014年7月31日におけるヨム川流域における渇水リスクを、渇水平均継続期間をもとに評価した結果、渇水基準値を閾値 Q_{95} に設定した場合、ヨム川流域下流部東側に渇水リスクの高い地域が集中することが明らかとなった。また、渇水平均継続期間と小流域面積、小流域人口そして小流域内の土地利用ごとの相関関係より、3種類の渇水基準を設けたがいずれも小流域人口に影響されることが明らかとなった。渇水平均継続期間を用いることにより、渇水の「長さ」に着目した水文的渇水のリスク評価とその時空間的な分布を把握した。

研究対象地は雨季・乾季の季節がある流域のため、実際の水資源管理施策を検討するには水資源の季節変動を考慮することが求められる。また、水文的渇水リスクは人口との関係がみられたことから、取水による河川流量の変化を考慮したモデル構築や、将来的な渇水リスクを把握するために計算期間を将来へ拡張することは重要な課題である。同時に、渇水リスクごとに関係のある要素を考慮したシナリオ構築と分布型流域モデルを活用したシナリオシミュレーションを行うことで、効率的な水資源管理計画の検討を行うことが可能となる。

参考文献

- 1) 佐藤政良：地球的な水資源限界時代における水文・水資源研究, 水文・水資源学会誌, Vol. 31, No. 1, pp. 4-6, (2018)
- 2) 高橋潔, 松岡譲, 島田洋子, 嶋村亮：気候変動下での地球規模の水資源評価と渇水対策戦略評価のためのモデル開発, 地球環境シンポジウム議事録, Vol. 8, pp. 175-180, (2000)
- 3) 濱崎宏則：統合的水資源管理 (IWRM) の概念と手法についての考察, 政策科学, Vol. 16, No. 2, pp. 83-93, (2009)
- 4) 国土交通省, タイの洪水について, https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouiinkai/r-jigyohuyouka/dai02kai/dai02kai-siryou7.pdf (2020/5/26 最終アクセス)
- 5) MS&AD InterRisk Report, InterRisk Thai Flood Report, Vol. 2020, No. 01, (2020)
- 6) Asian Development Bank, <https://www.adb.org/> (2020/8/8 最終アクセス)
- 7) T. Tingsanchali and F. Karim: Flood-hazard assessment and risk-based zoning of a tropical flood plain: case study of the Yom River, Thailand, Hydrological Sciences Journal, Vol. 55, pp. 145-161, (2010)
- 8) National Drought Mitigation Center, <https://drought.unl.edu/> (2020/5/26 最終アクセス)
- 9) BRIGHT TV HP, <https://www.brighttv.co.th/> (2020/5/25 最終アクセス)
- 10) 手計太一：タイ王国の水資源開発——歴代為政者たちの水資源政策, 現代図書, pp. 224, (2008)
- 11) K. Sawatpru and S. Konyai: Hydrological drought frequency analysis of the Yom River, Thailand, KKKU Engineering Journal, Vol. 43, No. 2, pp. 100-107, (2016)
- 12) P. Petchprayoon, P. D. Blanken, C. Ekkawatpanit, and K. Husseinc: Hydrological impacts of land use/land cover change in a large river basin in central-northern Thailand, INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, Vol. 30, No. 13, pp. 1917-1930, (2010)
- 13) U. S. EPA: Estimating Hydrology and Hydraulic Parameter for HSPF, BASINS Technical Note 6.
- 14) 山下隆男, 嵯峨拓朗：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, Vol. 52, pp. 1101-1105, (2005)
- 15) 佐藤圭輔, 椿涼太, 戸田祐嗣, 辻本哲郎：水・物質動態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, Vol. 14(2・3), pp. 70-74, (2009)
- 16) 矢澤大志, 清水芳久：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, 環境システム計測制御学会, Vol. 19(2・3), pp. 92-100, (2014)
- 17) 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(2・3), pp. 22-31, (2019)
- 18) 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, Transactions of the ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900, (2007)
- 19) 国土交通省, 水資源問題の原因, http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk2_000021.html (2020/2/2 最終アクセス)
- 20) 北村友毅, 石塚正秀, 紀伊雅敦, 林礼美：都市流域内人口密度を用いた世界の都市における水ストレス度の算定——イスラエルにおける事例解析——, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. 129-136, (2017)
- 21) 林礼美, 元圭吾, 田利正：世界の水ストレス度変化と要因の分析, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 35, No. 4, pp. 40-49, (2014)
- 22) M. Black: The Atlas of Water: Mapping the World's Most Critical Resource, Univ of California Press, (2016)
- 23) LandScan™ HP: <https://landscan.ornl.gov/> (2020/5/26 最終アクセス)
- 24) P. Raskin, P. H. Gleick, P. Kirshen, R. G. Jr Pontius, and K. Strzepek: Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world, Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden, pp. 78, (1997)
- 25) 田尻要, 神野健二, 河村明：リスク解析による渇水レベルに応じた対応方策の評価, 水文・水資源学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 259-269, (1997)
- 26) 李相潤, 石井敦, 申文浩, 谷口智之, 佐藤政良：韓国近代前期における河川灌漑田の利水安全度, 農業農村工学会論文集

- IDRE Journal, Vol. 304(85-1), pp. 105-115, (2017)
- 27) 平林由希子, 鼎信次郎, 沖大幹, 江守正多, 竹内邦良: 超高解像度温暖化実験による極値河川流量の長期変動, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, (2005)
- 28) 手計太一, 道谷健太郎, 加藤拓磨: タイ北部ナン川上流域における流況変化, 水文・水資源学会, Vol. 31, No. 1, pp. 17-24, (2018)
- 29) 近藤純正: 蒸発散量と降水量の気候学的関係, 日本気象学会, Vol. 45, No. 4, pp. 269-277, (1998)
- 30) EnterRisk Thailand Report, 2016年タイの干ばつについて, No. 3, (2016)
- 31) 独立行政法人農畜産業振興機構 HP : <https://vegetable.alic.go.jp/yasaijoho/index/kaigai/index.html#111> (2020/2/6 最終アクセス)

Evaluation of Water Stress and Drought Risk for Integrated Water Resources Management in the Yom River Basin, Thailand

Ayumi Okabayashi^{1)†}, Taishi Yazawa²⁾, Seiji Hashimoto²⁾ and Keisuke Sato²⁾

¹⁾ Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²⁾ College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

† Correspondence should be addressed to Ayumi Okabayashi:

(Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

E-mail: rv0058pk@ed.ritsumei.ac.jp)

Abstract

This research aims to evaluate spatiotemporal drought risk from multiple perspectives for Integrated Water Resource Management (IWRM) in the Yom River Basin, Thailand. Flow rate and actual evapotranspiration were simulated using a distributed hydrologic model, Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF), to estimate water stress and average drought duration for each sub-basin. Water stress is related to the socioeconomic drought risk, while the average drought duration is set as an indicator to assess the hydrological drought risk. The results showed that areas with high water stress located on the east side of the basin. It was also revealed that areas of high drought risk located on the east side of the lower basin. To identify the distribution of multiple drought risks with different drought factors is a useful insight in considering effective scenarios for IWRM.

Key words : IWRM, HSPF, Yom River Basin, water stress, drought risk