

19. 確率評価を用いた洪水緩和と水資源確保を考慮した季節スケールでの大ダム貯水池操作の検討

小森 大輔^{1*}・Cherry May Mateo²・佐谷 茜²・中村 晋一郎²・木口 雅司²・
Phonchai Klinkhachorn³・Thada Sukhapunnaphan³・Adisorn Champathong³・
竹谷 公男⁴・沖 大幹²

¹東北大学大学院環境科学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

²東京大学生産技術研究所（〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1）

³Office of Water Management & Hydrology, Royal Irrigation Department (811 Samsen Rd, Dusit, Bangkok 10300, Thailand)

⁴国際協力機構（〒102-8012 東京都千代田区二番町5-25）

* E-mail: komori@kaigan.civil.tohoku.ac.jp

本研究では、洪水緩和と水資源確保に効果的な季節スケールでのダム貯水池操作の検討を行った。チャオプラヤ川上流域における流出特性と下流域の洪水発生の関係より、雨季におけるダム貯水池操作は、シリキットダムは8月に、プミポンドダムはチャオプラヤ川下流域の洪水発生を考慮し7月に、それぞれの最低貯水量を設定し、11月まで貯水をする操作をすることが効果的であることがわかった。そして、設定した最低貯水量から空き容量を推定し、空き容量と両ダムの流入量の確率評価を比較することで、洪水緩和と水資源確保の重要度を考慮した季節スケールでのダム貯水池操作が検討できることを示した。

Key Words : dam reservoir operation, probability analysis, Chao Phraya River

1. はじめに

2011年は、東日本大震災を筆頭に多くの自然災害が発生した。国際防災戦略（International Strategy for Disaster Reduction, United Nations: ISDR）によれば、世界全体で2011年の自然災害による経済損失額は3660億ドルに達し、その額は1900年以降過去最大であったことが示されている¹⁾。2011年の経済損失額の半数以上が東日本大震災によるものだが、それ以外はほとんど気象災害によってもたらされ、気象災害の件数は全体の約9割を占めている。気象庁（2012）によれば²⁾、80億ドルの経済損失をもたらしたアメリカ南部やメキシコ北部における異常高温（3～9月）や異常少雨（1～11月）、900人の死者を出したブラジル南東部の大雨（1月）、500名超の死者を出したパキスタンの多雨（8～9月）、1400万人に影響を与えたアフリカ東部の干ばつ（1～9月）、そしてタイで813名の犠牲者を出したインドシナ半島の多雨（7～11月）など、世界各地で異常気象・気象災害が発生した。とくにインドシナ半島における2011年7～11月

にかけてもたらされた多雨は、タイ北・中部において甚大な洪水被害をもたらし、日本経済にも大きな影響を及ぼした。

河口に首都バンコクが位置しタイの中央平原を流れるチャオプラヤ川は、狭窄部であるナコンサワン市で上流域と下流域に二分される（Fig. 1）。上流域の総面積は約11万km²で、ピン川にはプミポルダム、ナン川にシリキットダムというそれぞれ国王、女王の名前を冠した大ダムが、1964年、1974年に利水と発電目的のために建設された。貯水容量はそれぞれ135億m³、95.1億m³（有効貯水容量はそれぞれ97.62億m³、66.68億m³）と極めて大きく、それぞれ2.3年分、1.5年分の総流量を貯めることが可能な容量である。手計ら（2012）によると、この2つの大ダム建設により下流の流況は最低流出量が増加し³⁾、また小・中規模の洪水を約40%減少させ、大規模洪水についても約35%を減少させている⁴⁾。一方で、タイの水田灌漑率は全国平均で約2割、比較的投資が進んでいるチャオプラヤ川流域でも5割程度に留まり、雨がほとんど降らない乾季の米作を実現するためにはこれ

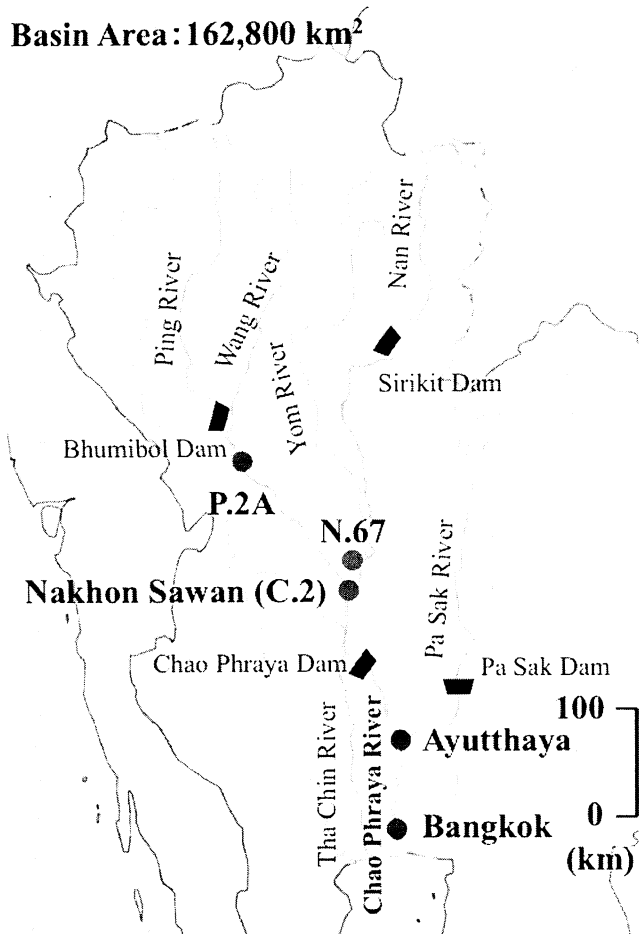


Fig. 1 チャオプラヤ川流域図

らの貯水池にどれだけ雨季の洪水を貯めておけるかが重要である。

下流域は極端に緩やかで、例えばバンコクの北、河口から約 100 km の地点に位置するアユタヤの標高はわずかに 7 メートルで、勾配は 1 万分の 1 よりも緩やかである。河道は数多くの蛇行をし、洪水時には上流からの堆砂で河川の通水断面は縮小される。そのため、下流域では河川沿いに広大な氾濫水域が形成され、また氾濫水域が広がることは氾濫水位を低くする事に繋がり、結果として洪水災害軽減につながる。タイはこれまで、このような河川の特徴を活かしてチャオプラヤ川上流域の洪水はダムで貯水し、また下流域の洪水はバンコク中心部や工業団地がない右岸側を中心に氾濫面積を拡大させ、氾濫水位を低下させて洪水被害を軽減するという治水対策を行ってきた。

しかし、2011 年のチャオプラヤ川大洪水では、流域開発に伴って潜在的に増大していた水害リスクが平年の 1.4 倍の雨季の総降水量によって顕在化した⁵⁾。チャオプラヤ川の流出特性は、1 日や 1 週間といった短い時間単位の雨が、たとえ平年の 2 倍であっても流域全体の洪水には結びつかない。その一方で、降水量の季節予報は未だ最先端研究課題の一つであり、定量的な雨季の総降水

量の予測は未だ困難である。

2012 年、タイ政府はすぐにできる対策として、ブミポルダムとシリキットダムの貯水池操作を 5 月には貯水量を 45% に下げると変更し、例年の乾季の倍の量を放流した。従前から両ダムの貯水池操作は経験に基づく運用がされてきており⁶⁾、巨大な貯水容量を有する両ダムの貯水池操作の変更は洪水緩和と水資源確保のトレードオフを誘発する。Cherry ら (2013) は、統合水資源モデル H08⁸⁾および広域氾濫原モデル CaMa-Flood⁹⁾を結合し、この新しいダム貯水池操作および更に洪水緩和に重点を置いたダム貯水池操作を検証し、洪水緩和と干ばつ緩和のトレードオフを実証している⁷⁾。

洪水緩和と水資源確保の両方にバランスがとれた具体的なダム貯水池操作を検討するには、対象流域の洪水特性および両ダムの流入量の解析が必要不可欠である。そこで本研究では、1950 年代から 2011 年までの約 60 年間のデータよりチャオプラヤ川上流域における流出特性と下流域の洪水発生との関係を明らかにし、両ダムの実績流入量の流量確率評価を用いて、洪水緩和と水資源確保に効果的な季節スケールでのダム貯水池操作を検討した。

2. 研究対象流域および使用したデータ

本格的な夏の南西モンスーンが南アジアから東南アジア、そして東アジアを席卷するのに先駆けて 5 月に雨が降り始めるのがインドシナ半島であり、チャオプラヤ川流域はその中心部に位置している^{10) 11)}。タイの多くは熱帯サバナ気候に属しており、バンコクを例とすると、年間降水量の 9 割近くの雨をもたらす雨季 (5 ~ 10 月) と乾季 (11 月 ~ 4 月) に大きく分けられ、さらに乾季は 11 月から 1 月にかけての比較的冷涼な時期、2 月から 4 月の最も暑くなる時期の 2 つの季節に分けられる。

対象流域であるチャオプラヤ川上流域では、北部山系からピン川、ワン川、ヨム川、ナン川が流下しナコンサワンで合流する (Fig. 1)。狭窄部であるナコンサワンは、上流域からの流出量が全て流入する地点であるため、下流域の治水上重要な地点の 1 つである。

ダム貯水池は、ブミポル、シリキット両ダムの他にヨム川流域以外に 5 ダムあり、総貯水容量は 247 億 m³で、そのうちブミポル、シリキット両ダムが 93% を占める。両ダムの貯水池操作はナコンサワンに位置する C2 水文観測所における流量データを基に行われており、両ダムは雨季に上流域の洪水を貯水する役割だけでなく、それぞれ下流で合流するワン川およびヨム川からの洪水流入量を考慮して貯水池操作が行われている。

本研究では、上流域の流出特性を明らかにする地点として、ブミポルダム下流でピン川とワン川の合流点下流

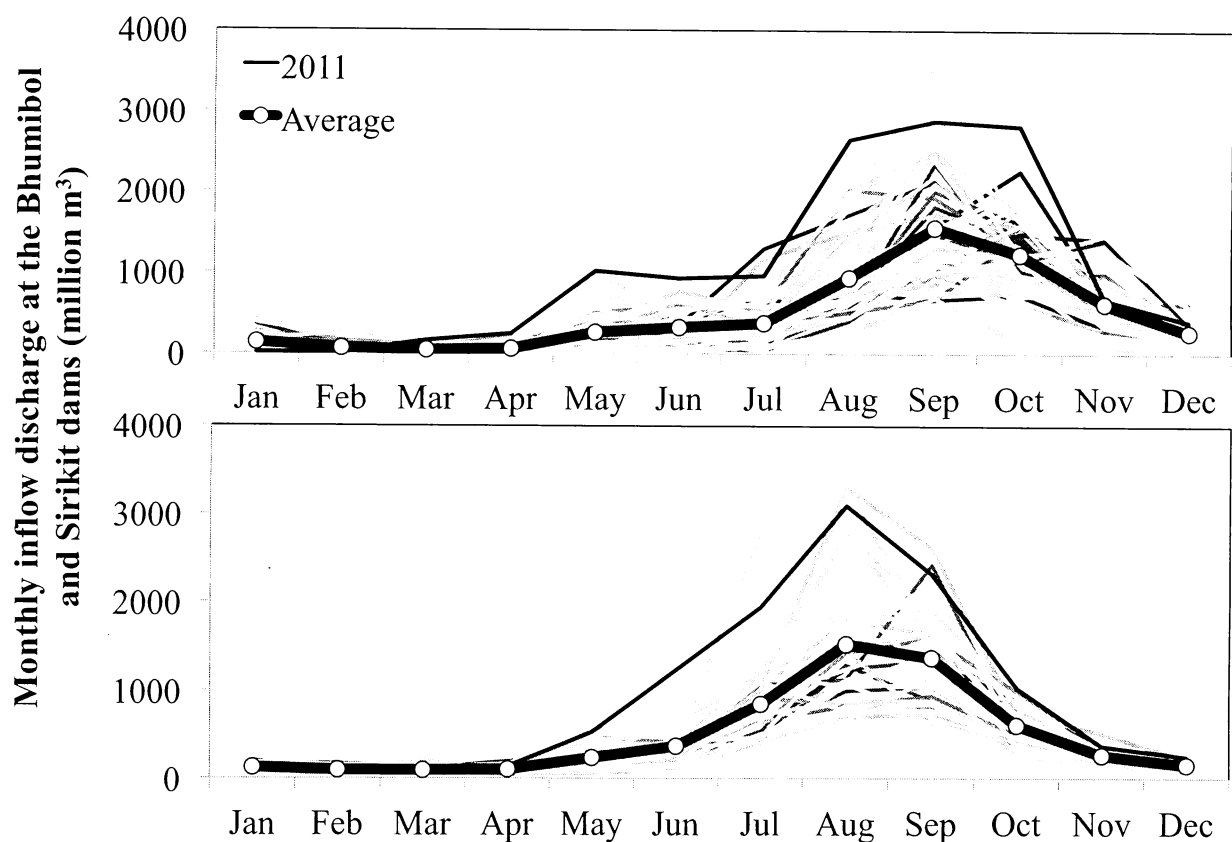


Fig2a ブミボルダム（上）およびシリキットダム（下）における実績流入量の月平均値。ブミボルダムは 1964 年から 2011 年、シリキットダムは 1974 年から 2011 年のデータを使用した。黒線は 2011 年の流入量、太線は対象期間の平均値を示す。

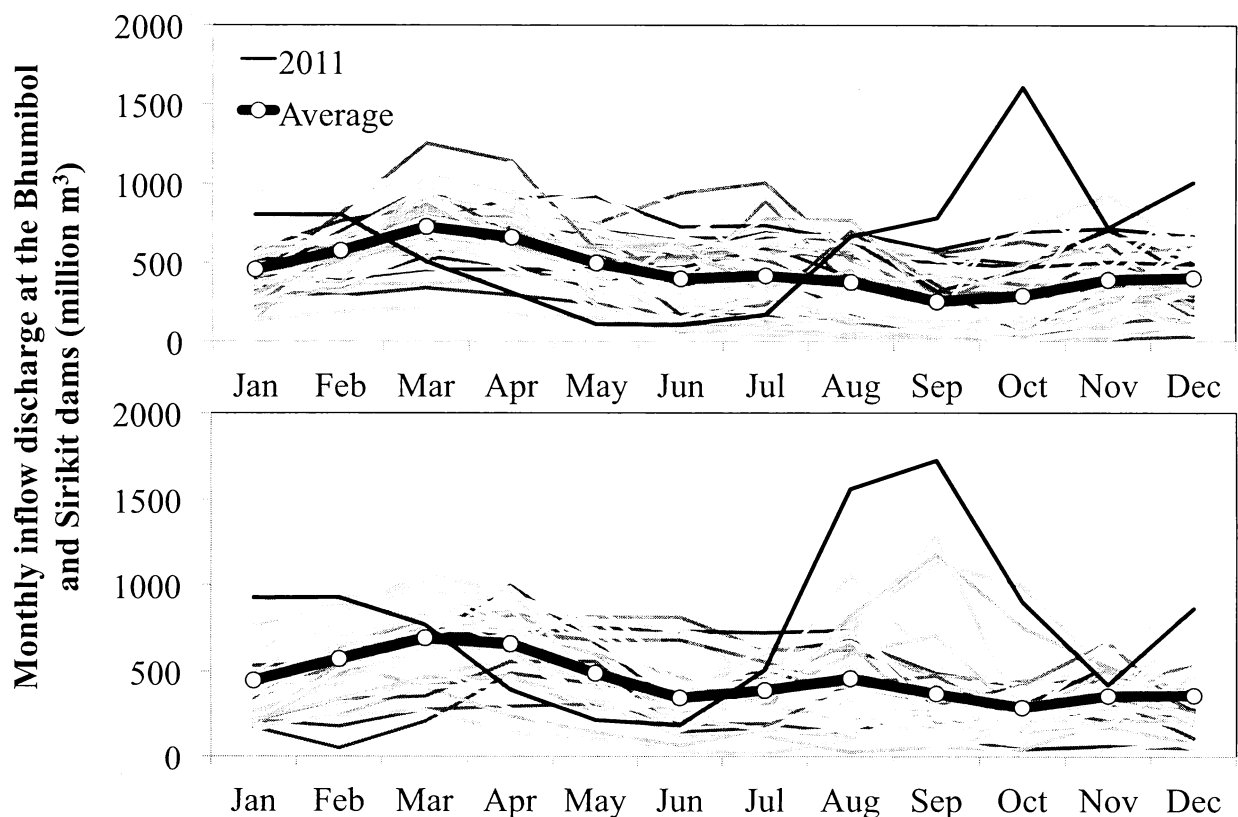


Fig2b ブミボルダム（上）およびシリキットダム（下）における実績放流量の月平均値。ブミボルダムは 1964 年から 2011 年、シリキットダムは 1974 年から 2011 年のデータを使用した。黒線は 2011 年の流入量、太線は対象期間の平均値を示す。

に位置するP.2A水文観測所、シリキットダム下流でナン川とヨム川の合流点下流に位置するN.67水文観測所、さらに上流域の流出特性と下流域の洪水発生との関係を明らかにするために、C.2水文観測所を対象地点とした（Fig. 1）。P.2A水文観測所は1952年から、N.67水文観測所は1997年から、C.2水文観測所は1956年から2011年までの日流量データを用いた。また、ブミボルダム建設後の1964年以降の期間においては各地点にて実績流量にブミボルダムとシリキットダムの調節量を戻した流量（以後、ダム戻し流量とする）を算出した。なお、本研究ではダム戻し流量の算出に際して河道流下時間は考慮していない。そして、1964年前の実績流量と1964年以降のダム戻し流量を1セットとして、ダム貯水池の影響を取り除いた流量（以後、自然流況流量とする）とした。次に、洪水緩和と水資源確保に効果的なダム貯水池の操作においては、効果的なダム貯水池操作の検討においては、両ダム建設以降から2011年までの放流量から乾季および雨季の放流量を設定し、流入量の水文統計解析を行った。

3. 上流域の流出特性と下流域の洪水発生状況

(1) ブミボルダム及びシリキットダムにおける流入量と放流量

Fig.2aおよびFig.2bにブミボルダムおよびシリキットダムにおける実績流入量と実績放流量の月平均値を示す。ブミボルダムおよびシリキットダムの乾季における実績流入量は非常に小さく、ピーク流量はブミポンダムが9月、シリキットダムは8月にみられた。2011年の流入量はブミボルダムが3月、シリキットダムが5月から流入量が増加し、対象期間分を平均した月流入量より大きい流入量が10月まで継続して流入した。対象期間分を平均した年間総流入量はブミボルダムが58.33億 m^3 、シリキットダムは57.85億 m^3 で、両ダムとも同程度であるが、比流量ではそれぞれ260 mm/s、515 mm/sと約2倍の違いがある。さらに、有効貯水容量ではブミボルダムの方が1.5倍大きいことより、シリキットダムの方がブミボルダムより流入量に対して貯水容量が小さいことがわかる。

実績放流量に関しては、貯水状況に応じてばらつきはあるが、乾季に大きく雨季に小さい傾向がみられた。一方、2011年の雨季の放流量は対象期間で最大であった。

(2) P.2A水文観測所におけるブミボルダム貯水池の影響と洪水発生状況

Fig. 3にP.2A水文観測所における自然流況流量とブミボルダムが建設された1964年以降の実績流量の月平均値、および自然流況流量と実績流量においてP.2A水文観測所における流下能力（4230 m^3/s ）を越えた流量分を積算し

た積算推定氾濫量を示す。ここで、推定氾濫量は実際に氾濫した流量ではなく流下能力から推定した仮想的な量である。対象期間分を平均した自然流況流量および実績流量より、1964年のブミボルダム完成後、乾季における流量は増加し、雨季の8月から10月における流量は減少し、安定的に下流へ水資源を供給するというダム貯水池の効果が明瞭に表れている。自然流況流量では9月にピークがみられたが、実績流量ではみられなかった。一方、2011年の実績流量は、ブミボルダムからの放流量とパターンがほぼ一致しており（Fig.2b）、10月をピークに8月から流量が大きくなった。実際に、10月初旬にブミボルダムが満水となったため、同月上中旬に洪水吐からの放流行われた際にはP.2A水文観測所近辺の地盤高の低い地域で1週間程度の外水氾濫が発生している。

積算推定氾濫量は、流下能力が非常に大きいため自然流況流量でのみ生じており、内訳は全60ヶ年のうち、1959年9月に7600万 m^3 を記録し、2009年10月は2200万 m^3 が推定された2回だけであった。すなわち、P.2A水文観測所においては、例えばブミボルダムがなくても過去に洪水が発生する頻度は非常に少なかったことが推察される。

(3) N.67水文観測所におけるシリキットダム貯水池の影響と洪水発生状況

Fig. 4にN.67水文観測所における自然流況流量と実績流量の月平均値、および自然流況流量と実績流量においてN.67水文観測所における流下能力（1580 m^3/s ）を越えた流量分を積算した積算推定氾濫量を示す。対象期間分を平均した自然流況流量および実績流量より、1974年のシリキットダム完成後、乾季における流量は増加し、雨季の6月から10月における流量は減少し、ダム貯水池の効果が明瞭に表れている。一方、P.2A水文観測所と異なり、自然流況流量では9月、実績流量では10月にピークがみられた。シリキットダムの放流量ではそのようなピークはみられないことより（Fig.2b）、自然流況流量と実績流量のピークのずれはヨム川からの流入量による影響であると推察される。2011年の実績流量も同様で、シリキットダムからの放流量とパターンが一致していない（Fig.2b）。また、8月と9月の実績流量はシリキットダムからの放流量を下回っており、シリキットダムからN.67水文観測所までの区間で大規模な外水氾濫が発生していることが推察される。

自然流況流量における積算推定氾濫量は、9月をピークに6月から10月に生じ、積算推定氾濫量が多い8月と9月だけで6.36億 m^3 と総積算推定氾濫量の80%を占めることがわかった。また、積算推定氾濫量は全14ヶ年中2009年を除き毎年生じており、N.67水文観測所においては、シリキットダムがなかった場合にはほぼ毎年洪水が

発生することが推察される。なお、実績流量における積算推定氾濫量は9月と10月で生じるものの大幅に減少しており、シリキットダム貯水池の洪水緩和効果が認められる。積算推定氾濫の内訳は、2006年10月に117万 m³記録し、2011年9月から10月に9500万 m³記録した2回であり、兩年とも実際にチャオプラヤ川流域で大洪水が発生した年である。

(4) C.2水文観測所における上流域の流出特性と下流域の洪水発生状況

Fig. 5 にC.2水文観測所における自然流況流量とシリキットダムが建設された1974年以降の実績流量の月平均値、および自然流況流量と実績流量において河川管理を担っているタイ灌漑局がチャオプラヤ川下流域で洪水が発生する閾値としているC.2水文観測所での流量 (2500 m³/s)

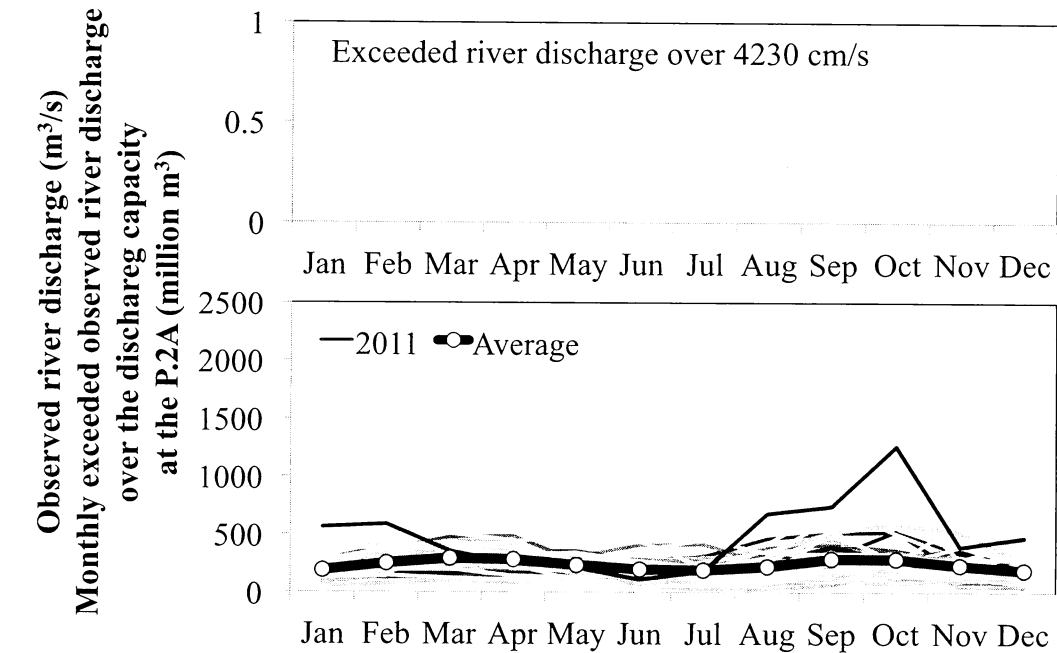


Fig.3a P.2A 水文観測所におけるプミボルダムが建設された 1964 年から 2011 年の実績流量の月平均値（下），および実績流量において P.2A 水文観測所における流下能力（4230 m³/s）を越えた流量分を積算した積算推定氾濫流量（上）。黒線は 2011 年の流量，太線は対象期間の平均値を示す。

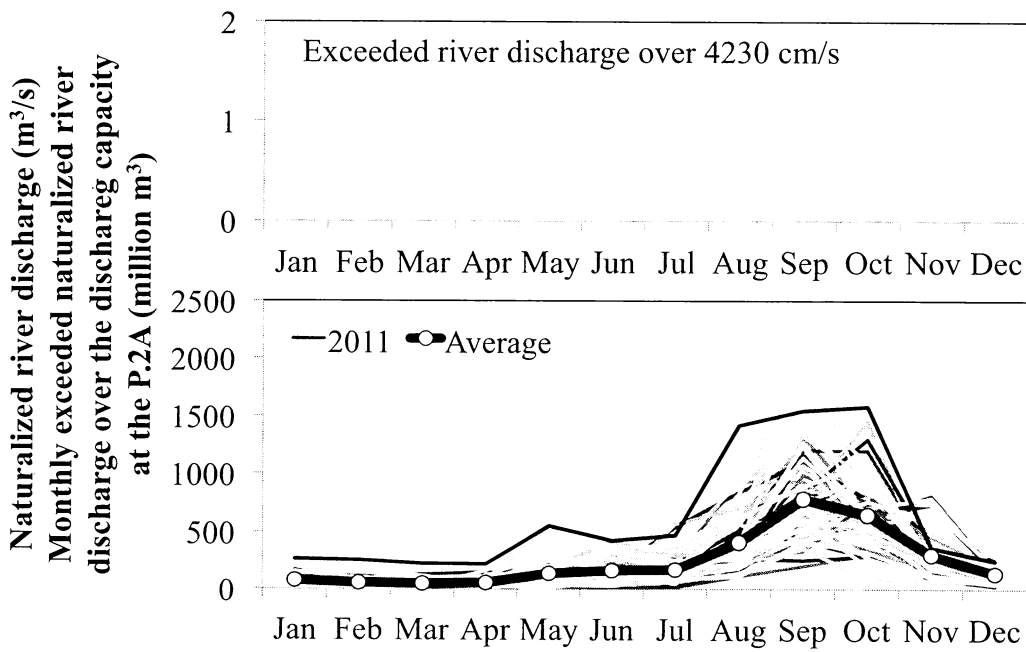


Fig.3b P.2A 水文観測所における 1952 年から 2011 年の自然流況流量の月平均値（下），および自然流況流量において P.2A 水文観測所における流下能力（4230 m³/s）を越えた流量分を積算した積算推定氾濫流量（上）。黒線は 2011 年の流量，太線は対象期間の平均値を示す。

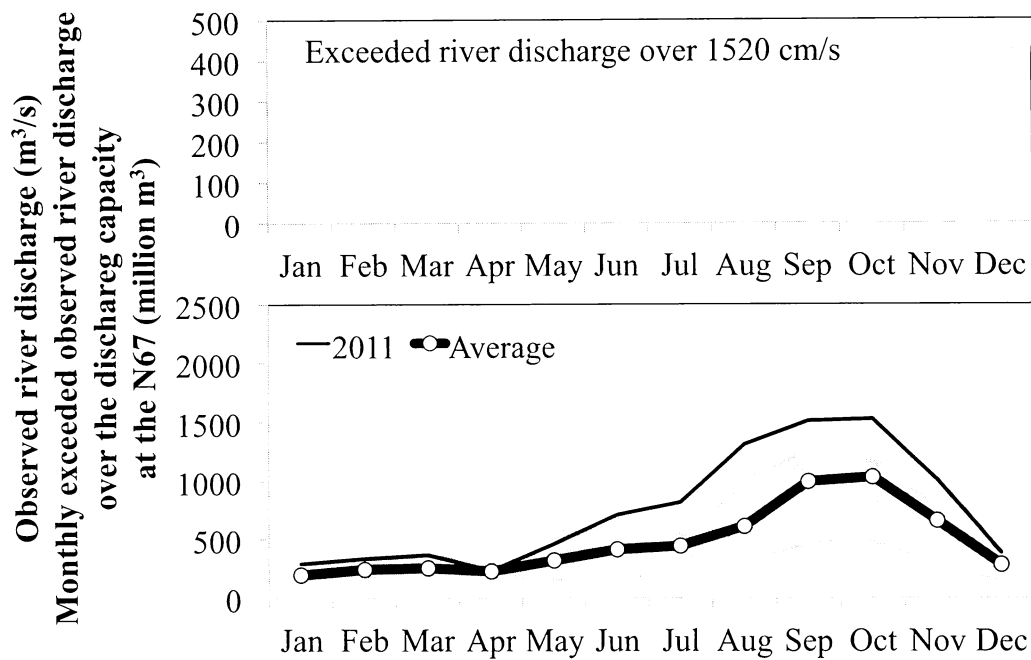


Fig.4a N.67 水文観測所における実績流量の月平均値（下），および実績流量において N.67 水文観測所における流下能力（1580 m³/s）を越えた流量分を積算した積算推定氾濫流量（上）．黒線は 2011 年の流量，太線は対象期間（1997 年から 2011 年）の平均値を示す．

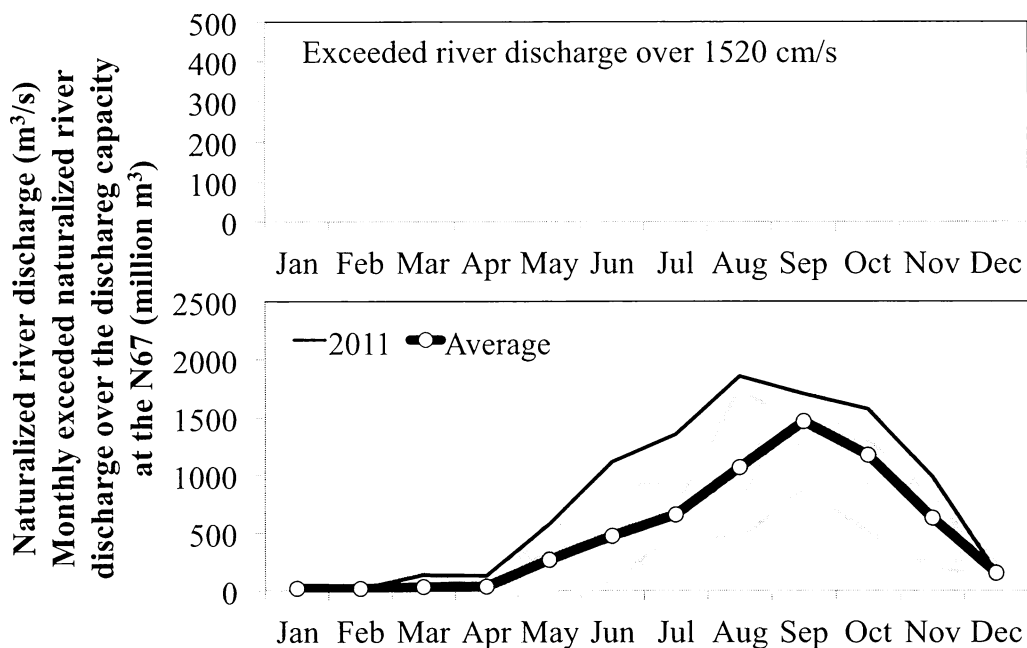


Fig.4b N.67 水文観測所における自然流況流量の月平均値（下），自然流況流量において N.67 水文観測所における流下能力（1580 m³/s）を越えた流量分を積算した積算推定氾濫流量（上）．黒線は 2011 年の流量，太線は対象期間（1997 年から 2011 年）の平均値を示す．

を越えた流量分を積算した積算推定氾濫量を示す．対象期間分を平均した自然流況流量および実績流量より，ブミポルダムおよびシリキットダムの完成後，乾季における流量は増加し，雨季の 7 月から 10 月における流量は減少し，安定的に下流へ水資源を供給するというダム貯水

池の効果が明瞭に表れている．2011 年の実績流量は，10 月をピークに 5 月から 12 月にかけて対象期間の平均実績流量を上回った．C.2 水文観測所の流下能力は 3590 m³/s で，9 月と 10 月の期間でその流量を上回っていた．実際に，C.2 水文観測所が位置するナコンサワンでは，2011 年 9

月に1/25年計画規模の現況堤防の上に緊急堤防を建設し外水氾濫を防いだが、10月21日に河道内に係留してあったボートの衝突により破堤し、市街地中心部が1 mから2 mの浸水となった。

自然流況流量における積算推定氾濫量は、10月をピークに5月から11月に生じ、積算推定氾濫量が多い9月と10月だけで30.75億 m³と全体の83%を占めることがわかった。また、積算推定氾濫量が生じなかった年は全56ヶ年中6ヶ年であり、積算推定氾濫量が生じる頻度は90%であった。なお、実績流量における積算推定氾濫量も10

月をピークに8月から11月で生じるが、総積算推定氾濫量は12.75億 m³と約60%も減少している。また、積算推定氾濫量の発生頻度は全38ヶ年中12ヶ年と大幅に減少し、両ダム貯水池の洪水緩和効果が認められる。

(5) 雨季におけるダム貯水池操作の検討

ブミポルダムからナコンサワンまでの区間は、河道の流下能力が大きいため、自然流況状態での洪水の発生確率は低いと考えられる。一方、シリキットダムからナコンサワンまでの区間は、河道の流下能力が低いことと、

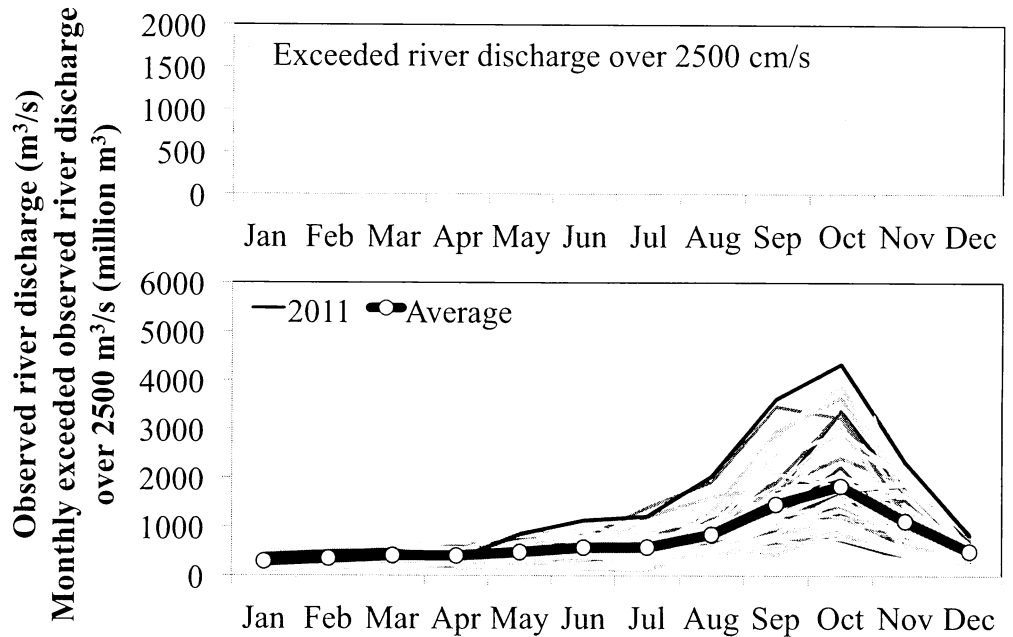


Fig.5a C2 水文観測所におけるシリキットダムが建設された 1974 年から 2011 年の実績流量の月平均値（下），および実績流量において 2500 m³/s を越えた流量分を積算した積算推定氾濫流量（上）．黒線は 2011 年の流量，太線は対象期間の平均値を示す。

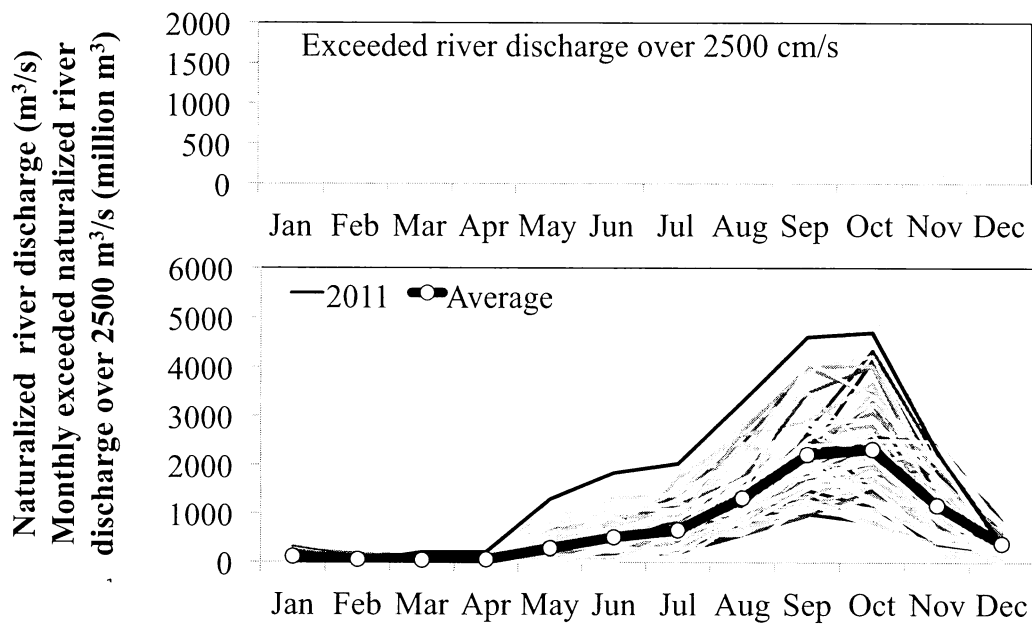


Fig.5b C2 水文観測所における 1956 年から 2011 年の自然流況流量の月平均値（下），および自然流況流量において 2500 m³/s を越えた流量分を積算した積算推定氾濫流量（上）．黒線は 2011 年の流量，太線は対象期間の平均値を示す。

ヨム川からの流入量の影響が大きいことより、自然流況状態での洪水の発生確率がブミボルダムからナコンサワンの区間より大きいことが推察される。特に、N.67 水文観測所における積算氾濫推定量では、8月と9月だけで総積算推定氾濫量の80%を占めることより、この期間の氾濫量をシリキットダムの貯水池操作でいかに緩和するかが重要である。

チャオプラヤ川下流域に関しては、自然流況状態では、9月と10月のC.2 水文観測所における積算氾濫推定量が総積算推定氾濫量の83%を占めることより、この期間の氾濫量を両ダムの貯水池操作でいかに緩和するかが重要である。また、両ダム建設後も依然として約3年に1回の割合での積算推定氾濫量が発生しており、特に流入量に対して非常に大きな貯水容量を有しているブミボルダムによるさらなる洪水緩和が重要である。

自然流況状態とは、いかにえればダムへの流入量と等量の放流をするダム貯水池操作である。すなわち、自然流況状態で氾濫が生じるということは、その分を貯水すれば洪水緩和になる。そこで、日スケールのダム貯水池操作による洪水緩和効果を検証するために、Fig. 6にN.67 水文観測所において実績流量で推定氾濫量が発生した2006年および2011年における自然流況流量と実績流量の日変動を示す。結果として、6、7月の積算推定氾濫量は数日間生じているだけであるため、後日放流調整をするという日スケールのダム貯水池操作で対応可能であることがわかった。これは、ブミボルダムの9月、10月の氾濫量が生じた場合でも同様であった。ただし、

この期間はチャオプラヤ川下流で大規模洪水が発生していることが想定されるため、このような日スケールのダム貯水池操作での対応はできない。

チャオプラヤ川下流域の場合では、5月、6月の氾濫量が生じた場合は先と同様であり、日スケールのダム貯水池操作で対応可能であった。一方、7月の氾濫量に関しては2011年の場合だけ異なり、2011年7月中旬から10月まで氾濫状態が続いた。そこで、貯水容量に余裕のあるブミボルダムだけのダム貯水池操作で対応可能であるかを検証するために、Fig. 7にC.2 水文観測所における2011年における自然流況流量とシリキットダムのダム戻し流量分だけ実績流量に加算した流量の日変動を示す。結果として、7月の氾濫量は日スケールのダム貯水池操作で対応可能になることがわかった。すなわち、貯水容量に余裕のあるブミボルダムを7月より洪水緩和に重点をおいて貯水池操作することで、7月の氾濫量を日スケールのダム貯水池操作で緩和できることがわかった。

以上より、雨季におけるダム貯水池操作は、シリキットダムは8月に、ブミポンダムはチャオプラヤ川下流域の洪水発生を考慮し7月にそれぞれの最低貯水量を設定し、11月まで貯水をする操作をすることが洪水緩和に効果的であることがわかった。

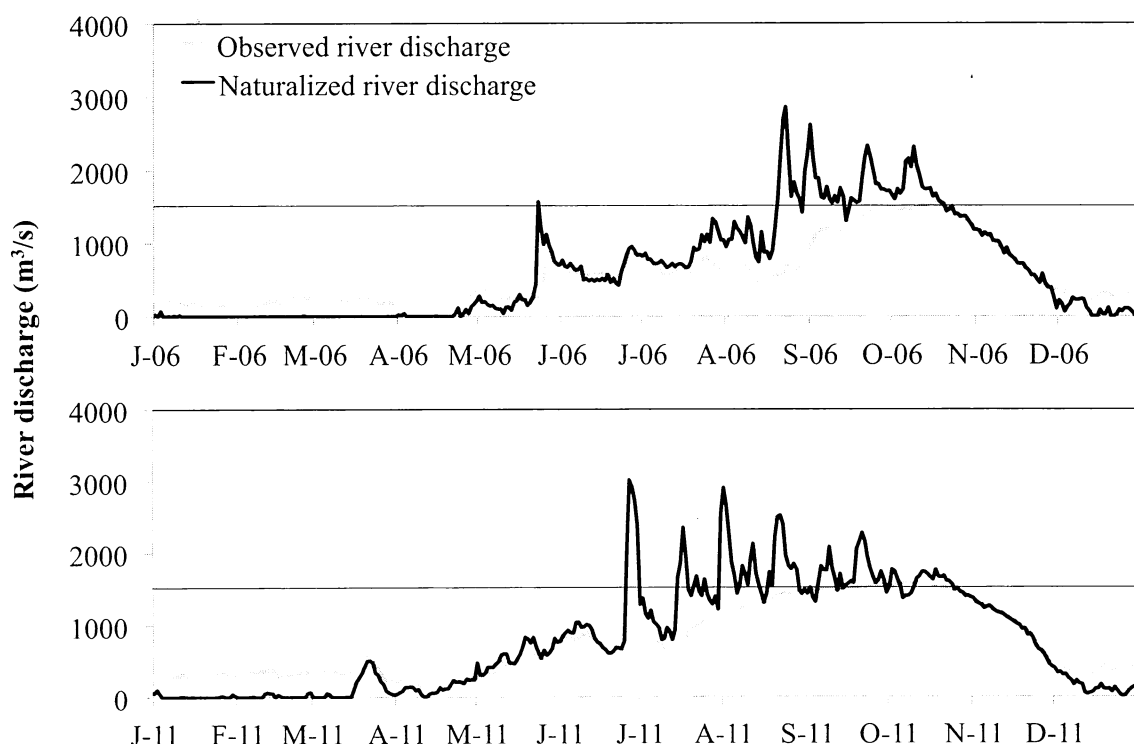


Fig. 6 N.67 水文観測所における2006年（上）および2011年（下）の自然流況流量と実績流量の日変動。

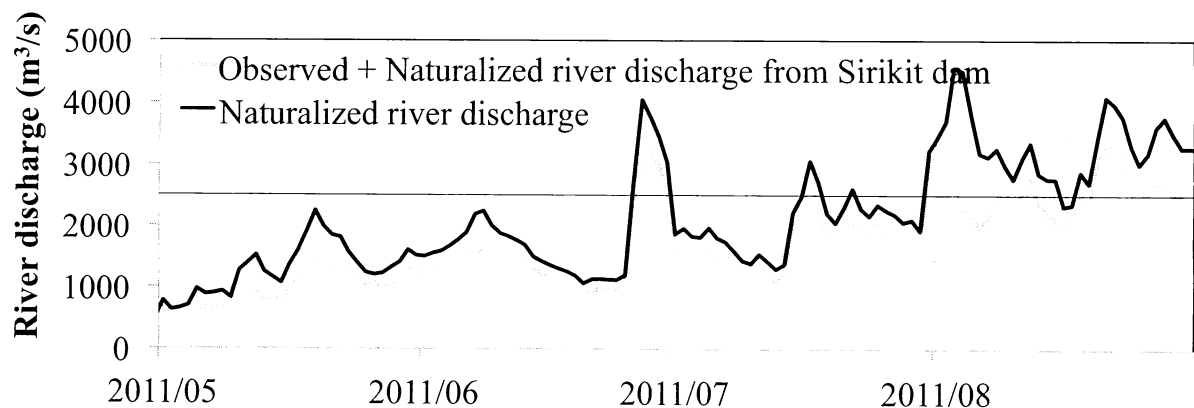


Fig. 7 C2 水文観測所における 2011 年 5 月から 8 月の自然流況流量とシリキットダムのダム戻し流量分だけ実績流量に加算した流量の日変動。

4. ダムの実績流入量の確率評価

降水量の季節予報は未だ最先端研究課題の一つであり、季節スケールのダム貯水池操作に用いることは難しい。そこで、ダム建設以降から 2011 年まで 40 年近くのデータが揃っていることより実績流入量の流量確率評価を行い、前節で提案した貯水池操作における最低貯水量とそのときの空き容量を推定し、この空き容量と確率流量を用いて洪水緩和と水資源確保に効果的な季節スケールでのダム貯水池操作を検討した。なお、ダム建設以後 40 年近く経っていることより有効貯水容量にて検討を行った。本研究における流量確率の算出には(財)国土技術研究センター水文統計ユーティリティ (2003 [12]) を利用した。確率分布の選定は、SLSC が最小（複数の場合は jackknife 推定値誤差が最小）となる手法を採用した。

(1) 放流量の設定

本研究では、2011 年までの 1 月から 4 月の平均実績放流量が乾季に必要とされる水量と仮定した。そこで、12 月の時点で乾季に必要とされる、ブミポルダムで 24.25 億 m^3 、シリキットダムで 23.73 億 m^3 の必要水量を確保するダム貯水池操作とした。なお、12 月の放流量は洪水にも利水にも影響を及ぼさないよう、流入量と等量の放流、もしくは設定水量に足りない場合は貯水する操作とした。

雨季における放流量に関しては、ブミポルダムは 5 月と 6 月、シリキットダムは 7 月まではダムより下流に洪水の影響を及ぼさないとして、流入量と等量の放流、もしくは設定水量に合わせるための貯水操作が妥当であると考えた。ブミポルダムの 7 月以降およびシリキットダムの 8 月以降の放流量は、2011 年までの平均実績放流量が洪水期におけるダム下流河川における洪水疎通能力と仮定した。そこで、ブミポルダムの 7 月以降およびシリキットダムの 8 月以降の放流量はそれぞれ 12.96 億 m^3 と 13.99 億 m^3 とする貯水池操作とした。

(2) ブミポルダムにおける流入量の確率評価

対象期間の 1964 年から 2011 年における 7 月から 11 月の総流入量の既往最大値は 2011 年の 99.67 億 m^3 、最小値は 1998 年の 12.57 億 m^3 であった。ここに雨季の放流量を差し引くとそれぞれ 86.71 億 m^3 、-0.39 億 m^3 となる。ここで、7 月から 11 月の総流入量が既往最小値であった 1998 年の値から乾季の必要水量を差し引くことで、乾季の必要水量を維持するために必要な 7 月時点の最小貯水量は 24.64 億 m^3 と推定され、ダムの空き容量は 72.98 億 m^3 となる。

Table. 1 に 1964 年から 2011 年の 47 ヶ年を統計期間とした、ブミポルダムの 7 月から 11 月の総流入量の確率水文量を示す。上述したダムの貯水池操作の場合、7 月時点のダムの空き容量と 7 月以降の放流量より 85.94 億 m^3 の洪水が貯水できる。2011 年と同等の 99.67 億 m^3 の流入量があった場合には 13.73 億 m^3 の洪水を貯水することはできないが、総放流量は貯水できなかった量を加算して 26.69 億 m^3 と 2011 年の実績放流量であった 39.42 億 m^3 より 32% 低減できることになる。また、既往第二位の 1973 年では、総流入量よりさらに約 7 億 m^3 多く貯水でき、参考値だが 50 年確率流量相当の流入量が貯水できることがわかつ

Table. 1 ブミポルダムにおける 7 月から 11 月の総流入量の確率評価推定結果（左）、既往最大および最小流入量（右）。標本数より過剰に大きい年数については灰色に反転表示し参考値として記載した。

確率分布	LN3Q		既往最大	
確率年	2年	45.61	2011年	99.67
	10年	68.61	1973年	78.98
	20年	76.21	1975年	72.41
	30年	80.37	1971年	72.01
	50年	85.40	既往最小	
	100年	91.93	1998年	12.57
	200年	98.22	1993年	19.49
	300年	101.80	1979年	24.77
精度	SLSC	0.025	2003年	24.94

た。

一方、既往最小の場合は乾季の流入量も小さいと考えられ、翌年7月に24.64億 m³に貯水池操作することは困難である。実際に、既往最小の流入量であった1998年は同年12月から1999年6月までの総流入量は11.18億 m³であり、7月の設定水量より13.46億 m³足りない。そこで、水資源確保に重点をおき仮に7月の設定貯水量を、足りない分を補填した38.1億 m³、さらに2年連続で既往最小の流入量が続くと仮定して51.56億 m³とした場合は、空き容量はそれぞれ59.52億 m³、46.06億 m³となり、雨季の放流量を差し引くとそれぞれ72.48億 m³、59.02億 m³となる。これはそれぞれ15年確率流量、5年確率流量に相当する。

このように確率流量を用いることで、洪水緩和と水資源確保のトレードオフを考慮した7月の設定貯水量が決めることができる

(3) シリキットダムにおける流入量の確率評価

対象期間の1974年から2011年における8月から11月の総流入量の既往最大値は1995年の71.69億 m³、最小値は1993年の17.46億 m³であった。ここに雨季の放流量を差し引くとそれぞれ57.7億 m³、3.47億 m³となる。ここで、8月から11月の総流入量が既往最小値であった1993年の値から乾季の必要水量を差し引くことで、乾季の必要水量を維持するために必要な8月時点の最小貯水量を推定すると27.2億 m³となり、ダムの空き容量は39.48億 m³となる。

Table.2に1974年から2011年の37ヶ年を統計期間とした、シリキットダムの8月から11月の総流入量の確率水文量を示す。上述したダム貯水池操作の場合、8月時点のダムの空き容量と8月以降の雨季の実績放流量より53.47億 m³の洪水が貯水できる。2011年と同等の71.69億 m³の流入量があった場合には14.66億 m³の洪水

Table.2 シリキットダムにおける8月から11月の総流入量の確率評価推定結果（左）、既往最大および最小流入量（右）。標本数より過剰に大きい年数については灰色に反転表示し参考値として記載した。

確率分布	LN2LM		既往最大	
確率年	2年	35.42	1955年	71.69
	10年	56.85	2011年	68.13
	20年	65.01	1975年	58.89
	30年	69.71	1994年	58.24
	50年	75.61	既往最小	
	100年	83.61	1993年	17.46
	200年	91.68	1992年	20.51
	300年	96.45	2009年	22.27
精度	SLSC	0.036	1979年	22.30

を貯水することはできないが、総放流量は貯水できなかった量を加算して28.65億 m³と2011年の実績放流量であった46.08億 m³より38%低減できことになる。また、8年確率流量相当の流入量は貯水できることがわかった。

一方、既往最小の流入量であった1993年の同年12月から1994年7月までの総流入量は19.71億 m³であり、8月の設定貯水量より7.49億 m³足りない。そこで、仮に8月の設定貯水量を足りない分を補った34.69億 m³、さらに2年連続で既往最小の流入量が続くと仮定して42.18億 m³とした場合は、空き容量はそれぞれ31.99億 m³、24.5億 m³となり、雨季の放流量を差し引くとそれぞれ45.98億 m³、38.49億 m³となる。前者は4年確率流量相当だが、後者は統計期間の平均流入量（37.7億 m³）をわずかに0.79億 m³上回るだけとなった。

このように確率流量による解析からも、シリキットダムは洪水緩和と水資源確保を両立するには貯水容量が十分でないことが示された。

5. まとめ

本研究は、洪水緩和と水資源確保に効果的な季節スケールでのダム貯水池操作を検討するために、チャオプラヤ川上流域における流出特性と下流域の洪水発生との関係を明らかにし、両ダムの実績流入量の流量確率評価を行った。

チャオプラヤ川上流域では、ピン川下流部は十分な流下能力があるが、ナン川下流部は流下能力が低く洪水発生割合が高いことがわかった。また、ブミポルダムはシリキットダムより流入量に対して比較的大きな貯水容量を有していることから、雨季におけるダム貯水池操作は、シリキットダムは8月に、ブミポルダムはチャオプラヤ川下流域の洪水発生を考慮し7月に、それぞれの最低水位を設定し、11月まで貯水をする操作をすることが洪水緩和に効果的であることがわかった。

そこで、ブミポルダムでは7月、シリキットダムでは8月の空き容量を推定し、ダムへの確率流入量とその時の空き容量を検討することで、洪水緩和と水資源確保に効果的な季節スケールでのダム貯水池操作を検討する手法を示した。一旦氾濫すると長期化してなかなか排水されないというチャオプラヤ川の流出特性より、下流域で氾濫が発生した場合、ダム貯水池では洪水緩和に重点をおいた貯水という操作が、流入量が減少する乾季まで数ヶ月間行われることとなる。つまり氾濫が生じた時点での空き容量が最大の洪水貯水容量であり、流入量の確率評価によってダム貯水池が満水になる確率年を推定できることは、季節スケールでの貯水池操作では洪水緩和と水資源確保のトレードオフの有効な

指標となると考える。

本検討において、シリキットダムは流量に対して十分な貯水容量を有していないため、シリキットダムだけでは洪水緩和と水資源確保を両立することが難しいことが示された。しかし、これは本研究で仮定した水資源確保量や放水量に関係しており、ダム下流の洪水状況や無効放水量を減らすなど、放流操作を改善することで、より改善できるであろう。また、本研究では考慮しなかったが、ダム湖からの蒸発もダム貯水池操作を検討する際には入れるべきである。

水資源確保の役割を果たしながらチャオプラヤ川上流域の洪水を全てブミポル、シリキット両ダムだけで貯水することは困難であることは本研究で示したとおりあからかである。氾濫を許容する下流の治水対策と連携することで洪水緩和機能の負担を分担し、洪水緩和と水資源確保のバランスがとれたダム貯水池操作が計画できる流域管理が重要である。

謝辞：本研究は、日本国際協力機構（JICA）及び科学技術振興機構（JST）の地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS)「気候変動に対する水分野の適応策立案・実施支援システムの構築（IMPAC-T）」の下で行われたものである。

参考文献

- 1) CRED, “EM-DATTheInternationalDisasterDatabase,” 2013
<http://www.emdat.be/>
- 2) Japan Meteorological Agency, 2012
<http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpl/monitor/annual/>
- 3) T. Tebakari, J. Yoshitani, and P. Suvanpimol, “Impact of large-scale reservoir operation on flow regime in the Chao Phraya River basin, Thailand,” *Hydrological Processes*. Vol. 26, pp.2411-2420, DOI:10.1002/hyp.9345, 2012.
- 4) T. Tebakari, J. Yoshitani, C. Suvanpimol, M. Miyamoto, T. Yamada, “Assessment of Flood Control and Water Supply Abilities of Large Scale Reservoir using Numerical Experiment –A Case Study in the Chao Phraya River Basin, Kingdom of Thailand-,” *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.* Vol. 20, No.3, pp.145-155, 2007 (in Japanese).
- 5) D. Komori, S. Nakamura, M. Kiguchi, A. Nishijima, D. Yamazaki, S. Suzuki, A. Kawasaki, K. Oki, and T. Oki, “Characteristics of the 2011 Chao Phraya River Flood in Central Thailand,” *Hydrological Research Letters*, Vol.6, pp.41-46, 2012.
- 6) T. Tebakari and J. Yoshitani, “Effect of Large-scale Dams on the Hydrological Regime; A Case Study in the Chao Phraya River Basin, Kingdom of Thailand,” *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.* Vol. 18, No.3, pp.281-292, 2005 (in Japanese).
- 7) C. May Mateo, N. Hanasaki, D. Komori, K. Yoshimura, M. Kiguchi, A. Champathong, D. Yamazaki, T. Sukhaphunnaphan, and T. Oki, “A Simulation Model for Assessing Impacts of Modifying Reservoir Operation Rules on Flood Mitigation and Water Supply,” *IAHS*, 2013 (submitted).
- 8) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., and Tanaka, K., “An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 1007-1025, doi:10.5194/hess-12-1007-2008, 2008.
- 9) Yamazaki, D., S. Kanae, H. Kim, and T. Oki, “A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model,” *Water Resour. Res.*, 47, W04501, DOI: 10.1029/2010WR009726, 2011.
- 10) Matsumoto J., “Seasonal transition of summer rainy season over Indochina and adjacent monsoon region,” *Adv. Atmos. Sci.*, 14, 231-245, 1997.
- 11) M. Kiguchi and J. Matsumoto, “The rainfall Phenomena during the Pre-monsoon Period over the Indochina Peninsula in the GAME-IOP Year,” *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 83, 89-106, 2005.
- 12) Japan Institute of Country-ology and Engineering, 2003 (Japanese)
<http://www.jice.or.jp/sim/t1/200608150.html>