

大ダムの持つ利水・治水効果に関する基礎的研究 —タイ王国・Chao Phraya 川上流域を対象として—

Foundational Study on Water Use and Flood Control Effect by the Large Scale Reservoir
—A Case Study in Upper Chao Phraya River Basin, Kingdom of Thailand—

手計太一¹・深見和彦²・Chanchai Suvanpimol³・宮本守¹・山田正⁴
Taichi TEBAKARI, Kazuhiko FUKAMI, Chanchai SUVANPIMOL, Mamoru MIYAMOTO
and Tadashi YAMADA

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ JST/CREST (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

²正会員 工修 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 上席研究員 (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

³非会員 Ms. Eng. Hydrology Division, Royal Irrigation Department (811 Samsen Road, Dusit, Bangkok 10300, Thailand)

⁴正会員 工博 中央大学理工学部 教授 (〒112-8551 文京区春日 1-13-27)

The goal of our study is to clarify the effect of the human activities on water resources and water circulation. The Chao Phraya River basin was selected for this study. The Chao Phraya River basin, the largest basin in Kingdom of Thailand is located in central and northern part of Thailand. This basin has two large-scale dams named Bhumibol Dam across the Ping River and Sirikit Dam across the Nan River. This large storage dams are beneficial to the country for generating electricity and discharging water for the irrigation project areas and flood mitigation on both banks of the Ping, Nan and the Chao Phraya rivers.

This paper has evaluated the water usage and flood control facilities of Bhumibol Dam. As the results of comparing the annual change of monthly runoff before and after dam construction, the minimum runoff increased drastically and the maximum runoff decreased.

As the results of numerical analysis, it is clarified the water usage has become stable and the high water has decreased by the operation of Bhumibol Dam.

Key Words: large scale dam, Chao Phraya River Basin, water use, flood control

1. はじめに

「水資源」は人間活動には欠かせない要素の一つであり、いかなる産業にも、そして人間自身が生きるためにも「水」は必須のものである。しかし、比較的利用しやすい淡水の量は、地球上に存在する水のわずか約 0.01% である¹⁾。その水を資源として利用するためには、降水や融雪水が河川を通り海水と混じり合う前に、貯水をしなければならない。そのために、古くからダムが存在する。ダムはこれまで人類の社会・経済の発展に多大な貢献をしてきた土木構造物の一つであるが、その一方で、自然環境や地域住民には負の影響を与えた面も否定できない。

近年、主に自然保護の観点から、世界中でダム建設反対の声が高まっている。日本では 1997 年の河川法の改正によって、基本的には治水や利水を考えつつ自然環境保全のための河川管理を求められている²⁾。さらに、1999 年に施行された環境影響評価法によって、事業着手前にその事業が環境に及ぼす影響を予測し、事業者として実行可能な範囲内で出来る限り事業による影響を回避し、

又は低減し、必要に応じて環境保全措置を施すなど環境の保全を適正に行うこととなった。

一方で、1950 年末までに地球上に存在したダムは 5,749 であったが、1998 年には 25410 と 50 年間で 4.4 倍に増加し、さらに 2002 年末の時点で工事中のダムは 1,333 以上になる³⁾。経済的に後発に属する国々のうち、政治や経済が安定化し、成長路線の軌道に乗った諸国は今まさにダム建設ラッシュであろう。経済の発展と安定のためには、水資源開発=ダム建設は欠くことのできない事業である。このような国々に水資源開発と自然環境保全の両立を訴えるためには、既存ダムの有効な利活用であると考えらる。

2003 年 3 月に開催された WWF3 において同意された「持続可能な水の確保」のためには、既存のダムの持つ利水や治水の効果を科学的に評価しなければならないと考える。既存のダムをこれまで以上に効率的に運用すれば、利水や治水機能を高めることも可能性がある。山田ら⁴⁾は治水の観点から新しい運用方法を提案し、結果的に

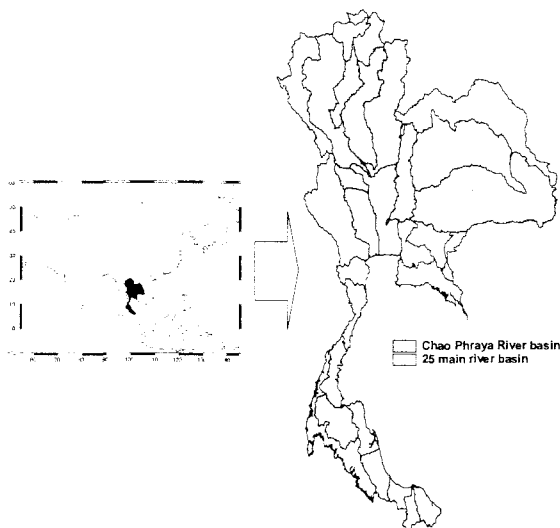


図-1 東南アジアに位置するタイ王国とタイ王国を代表する 25 の河川流域と Chao Phraya 川流域

利水にも効果的な手法を提案している。の中で、独自のダム放流理論に基づいて数値解法と図式解法による前期放流量算出手法を提案し、数値実験から現業の流量制御よりも水位を下げる事が可能となり、さらに利水容量が増える可能性を示唆している。

また古くからダムの最適運用手法の提案は数多くされている。例えば、室田らは普遍的な水資源計画方法論の確立のための基礎的な研究の一環として、等価線形貯水池システムを提案し、実用的な成果をあげている。貯水池群の最適操作の問題に対し DP を応用したのは Little⁶⁾ である。その後、高棹らは、最適制御問題に対し一般的手法として有効な DP を利用して、ダム群の治水や利水操作の最適操作の確立を求め、その有効性を明らかにしている。さらに、通年を通した複数のダムの貯水池操作支援を目的に、ダム操作規則参照用汎用推論エンジンの開発をしている⁹⁾。さらに最近では 1956 年に創案されたシステムダイナミックスを利用して、流域の社会・経済状況をも組み込んだ水需給構造のシミュレーションが行われている¹⁰⁾。

著者らは、タイ王国にとって社会・経済的に極めて重要である Chao Phraya 川流域を対象として、社会変動が水循環へ及ぼす影響の実態の解明と将来における水資源の有効な利活用を提言するためのモデル作りを行っている。この研究活動の一環として、著者らは既然大ダム建設が下流の流況へ与えた影響の実態について報告している⁹⁾。この中で、大ダムの建設は、下流の流況を大きく変容させたこと、そして、その運用によって、下流数百キロにも影響を及ぼしていることを指摘した。一方、本稿では、上述のような状況を鑑み、Chao Phraya 川流域に位置する大ダムが持つ利水・治水機能の評価を実際のデータから読み取り、数値計算を用いた基礎的な検討を行

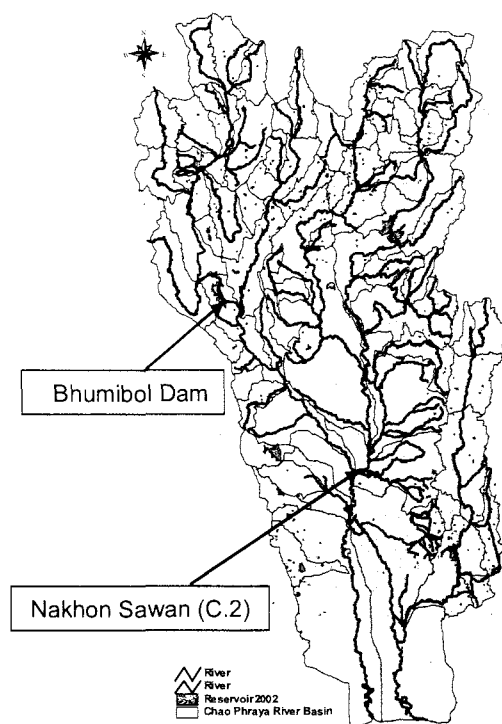


図-2 Chao Phraya 川流域とその河川網

表-1 Bhumibol ダムの諸元

Purposes		Irrigation Power Generation Flood Control	Purposes		Irrigation Power Generation Flood Control
Under Operation by		EGAT	Max. Water Level(m M.S.L.)		260.0
Local Community		A Sam Ngao, C. Tak	Normal Water Level(m M.S.L.)		250.0
Location	River	Ping	Min. Water Level(m M.S.L.)		213.0
	Latitude(N)	17° 14' 31"	for Power Operation		213.0
	Longitude(E)	98° 58' 31"	for Irrigation		202.5
Hydrology	Drainage Area(sq. km)	26,386	Reservoir	Storage at Max. W.L.(MCM)	13,462
	Annual Inflow(MCM)	5,256		Storage at Normal W.L.(MCM)	13,462
	Annual Inflow(mm)	199.2		Storage at Min. W.L.(MCM)	3,800
Dam	Type	Gravity Arch		Active Storage Volume(MCM)	9,662
	Height(m)	154.0		Active Storage Volume(mm)	366.2
	Crest Elevation(M.S.L.)	261.0	Spillway	Surface Area(sq. km)	316.0
Spillway	Crest Length(m)	486.0			
	Type	Tunnel Type			
	Crest Elevation(M.S.L.)	242.9			
	Control Gate	Radical Gate			
	Design Flood Volume(MCM)	7,670			
	Max. Discharge Capacity(cms)	6,000			

った。

2. 対象流域とダム

本研究が対象としたのは東南アジアのインドシナ半島に位置するタイ王国の北部山岳地帯から中央平原にまたがる Chao Phraya 川流域である(図-1)。流域面積は 157,925 km² で同国面積の約 30% を占め、29 の県に跨る同国最大の流域である。地形的には、北部の上流域は山岳地帯、中流域は氾濫原、下流域はデルタである。図-2 に Chao Phraya 川流域を示す。北部から流れる Ping 川(36,018 km²)、Wang 川(11,708 km²)、Yom 川(24,720 km²)、Nan 川(34,557 km²) が中流域に位置する Nakhon Sawan で合流し、Chao Phraya 川が始まる。さらに西側

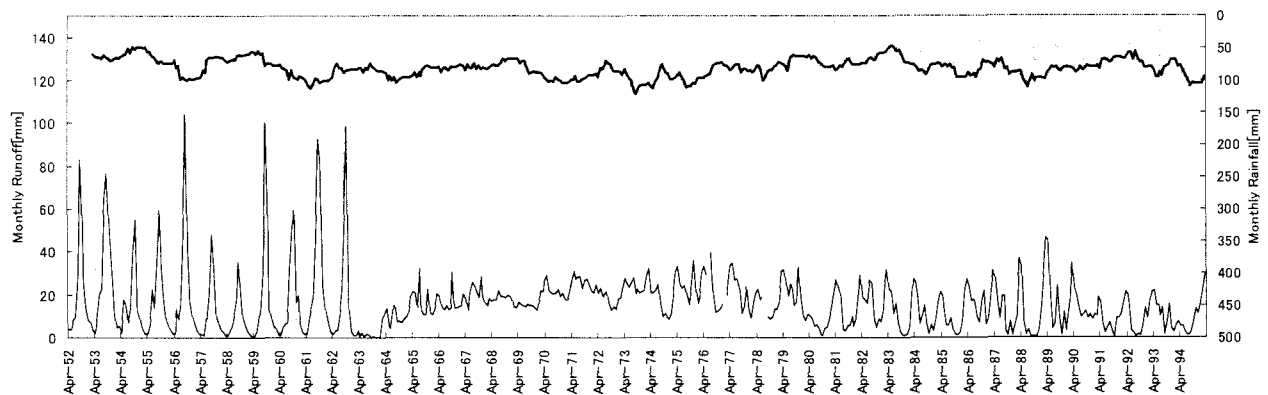


図-3 1952年から1994年までの Bhumibol ダム直下流 (P12 地点) における月流出量と流域平均月降水量の経年変化

から Sakae Krang 川が流入し、そして Ayutthaya で東から Pasak 川 (18,200km²) が合流し、タイ湾へ流れ出る。

Chao Phraya 川流域内にはタイ王国最大規模のダムが二つ存在する。本稿ではそのうちの一つである Bhumibol ダムの持つ利水・治水効果について検討を行った。

Bhumibol ダムは 1957 年、世界銀行の援助によって建設が認められた、タイ王国初の大規模かつ多目的のダムである。Bhumibol ダムの緒元を表-1 に示す。運用開始当時におけるダムの運用方法についての詳細な情報は得られていないものの、ダムを管理・運営する EGAT へのヒアリング調査の結果、過去の貯水容量時系列図から経験的に運営していたことがわかっている。1995 年以降になってようやく、上流域の降雨量を考慮したり、上限・下限運用カーブを作成するなどシステムチックな運用を行っている¹⁰⁾。

3. Bhumibol ダム建設前後における流域水文量の実態

(1) Bhumibol ダムによる影響の実態

図-3 は 1952 年から 1994 年までの Bhumibol ダム直下流 (P12 観測所) における月流出量と流域平均月降水量の経年変化である。図中上方に描画されている降水量の経年変化に重ねて記されている黒太線は、降水量の 12 ヶ月移動平均値である。降水量については特筆すべき長期的な傾向は見られない。

一方、流出量に着目すると、1964 年以前と以降では全く異なる挙動を示している。これは 1964 年 5 月から運用を開始した Bhumibol ダムの影響であることは明瞭である。ダム運用以前は降雨に対応した流出をしているため、ほとんど自然河川に近い挙動をしている。しかし、1964 年以降の流出量に注目すると、低水流量は増加し、高水流量は大幅に減少している。1960 年代後半から 1970 年代と 1980 年代以降とで流況が異なっている。その要因と

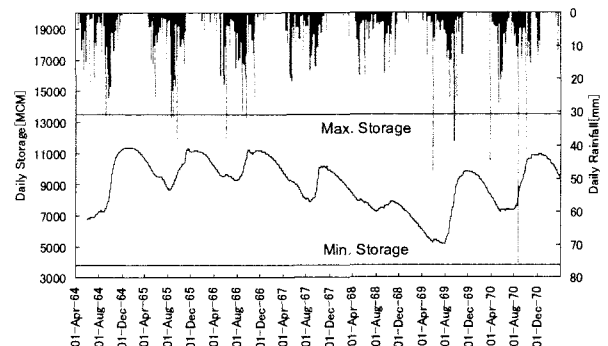


図-4 Bhumibol ダムの貯留量と流域平均日雨量

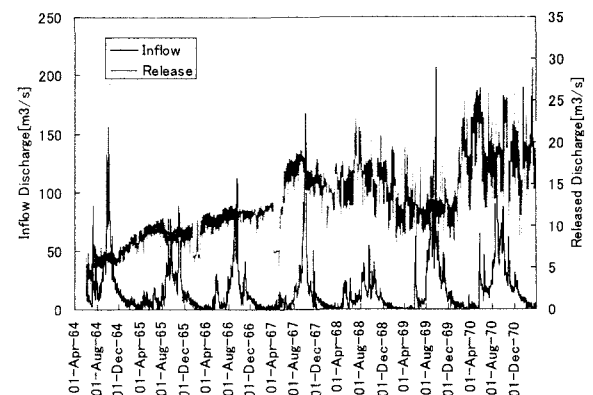


図-5 Bhumibol ダムからの日放流量と日流入量の経年変化

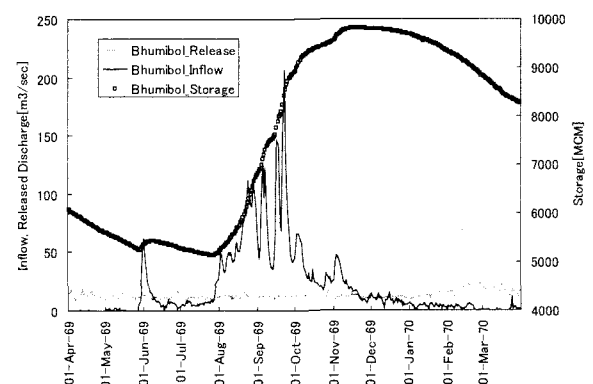


図-6 1969 年 4 月 1 日から 1970 年 3 月 31 日までの一年間における Bhumibol ダムの日貯水量、日放流量、日流入量の時系列

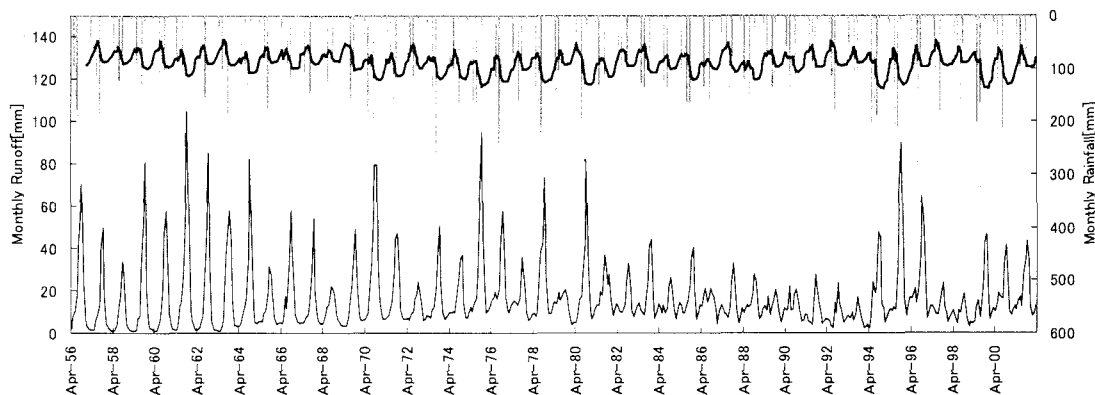


図-7 Nakhon Sawan (C.2 水文観測所) における月流出量と流域平均月降水量の経年変化

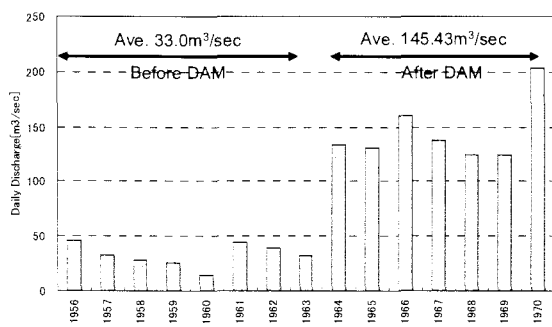


図-8 Bhumibol ダム建設前後に着目したNakhon Sawan (C.2)における年最小日流量の経年変化

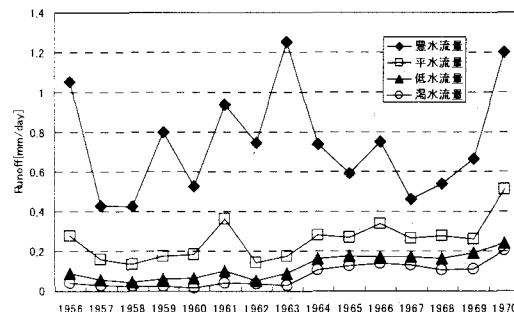


図-9 Bhumibol ダム建設前後に着目したNakhon Sawan (C.2)における洪水 低水 平水 豊水流量の経年変化

して、貯水量が安定してきたことや1974 年から運用を開始した Sirikit ダムによって、放流量を分担することが可能になったことが挙げられる。

図-4 は Bhumibol ダムの貯水量と流域平均雨量の経年変化、そして図-5 は Bhumibol ダムからの日放流量と日流入量の経年変化である。本稿では Bhumibol ダム一つが持つ利水・治水効果を論ずるため、解析期間を Sirikit ダムが運用開始される前の 1971 年までとしている。ダムが運用を開始した 1964 年から 3 年間における各年の最大貯水量は許容量の 85% 程度を維持している。1969 年には少雨のためダムの貯水量は許容量の 38% にまで減少した。図-5 中の日流入量を確認しても、その量が少なかったことがわかる。両図から、降雨や流入量のピークと貯水量の立ち上がりが一致している。雨期に貯水し続けることで、乾期の灌漑用水を貯えとともに、河川の氾濫を防ぐ役目も果たしていると言える。運用開始直後の放流量は 1969 年や 1970 年頃と比べると控えめである。これは貯水量を維持するための運用であったことが推察できる。また日放流量は乱れが大きいことから、トライ＆エラーに近い経験的な運用方法をしていたことがうかがえる。

図-6 は 1969 年 4 月 1 日から 1970 年 3 月 31 日までの一年間における Bhumibol ダムの日貯水量、日放流量、日流入量の時系列を示している。例えば 1969 年 7 月 1

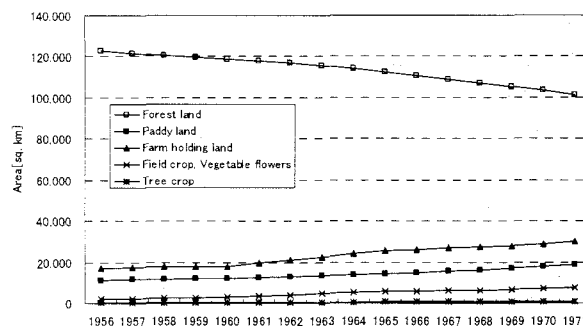


図-10 タイ北部地域における土地利用の経年変化

日にピークを持つ流入量に着目すると、流入に応じて貯水量も増加している。また 1969 年 9 月下旬にピークを持つ洪水についても同様に、貯水量が増加している。このようなことから、洪水時には治水のための運用をしていると言える。

(2) Nakhon Sawan における各水文量の変化

Nakhon Sawan (C.2 観測所) は北部山岳域から流れて来る Ping 川と Nan 川が合流し、Chao Phraya 本川が始まる地点であるので、下流域における洪水予測の基準となっている。そのため、本研究においても Nakhon Sawan を懸案地点として選定した。

図-7 は Nakhon Sawan における月流量と流域平均月降水量の経年変化である。図中上方の黒太線については

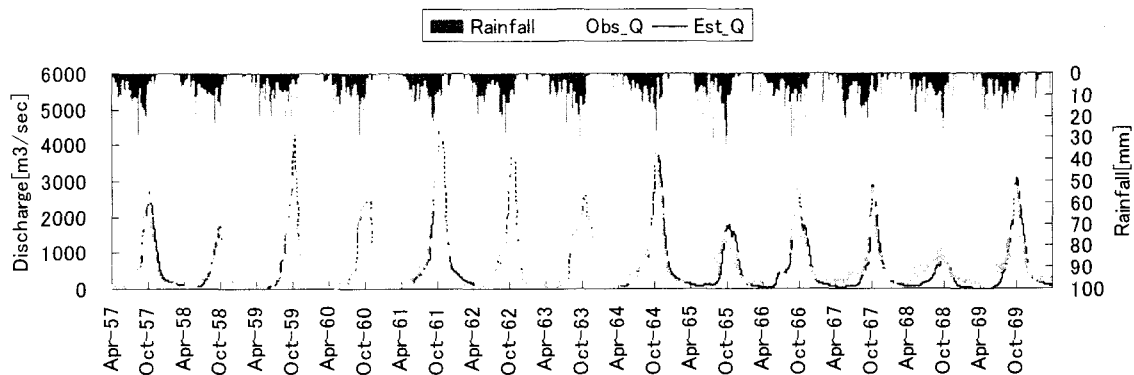


図-11 Nakhon Sawanにおける1956年4月1日から1970年3月31日までの降水量と流量の観測値と流量の再現計算の結果

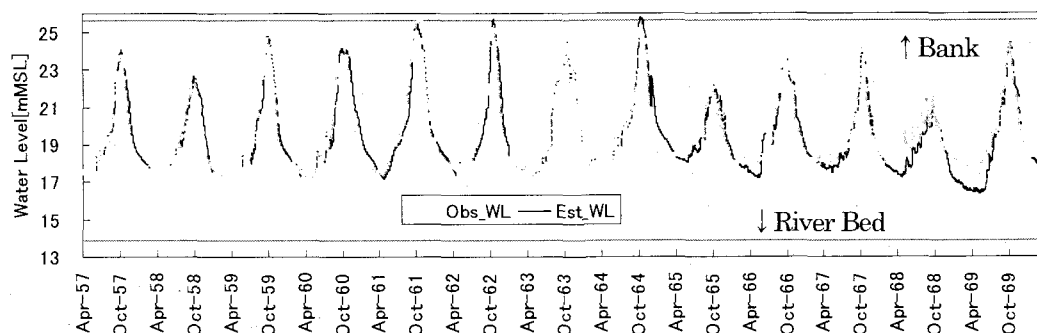


図-12 Nakhon Sawanにおける1956年4月1日から1970年3月31日までの水位の観測値と再現計算の結果

図-3と同様である。降水量については長期的に有意な傾向は得られなかった。Bhumibol ダムの運用が開始された1964年以降の流出量に着目すると、明瞭に低水流量が増加している。高水流量については、1980年までは大きく減少したような傾向は見られない。1981年から1993年にかけては高水流量が減少している。この要因については明快な回答は得られていないものの、Sirikit ダム建設によって、2つの大ダムの総合運用に依る治水効果が直接的に反映されたものと推察できる。

図-8はBhumibol ダム建設前後に着目したNakhon Sawanにおける年最小日流量の経年変化である。ダム建設以前の平均値は33.0m³/secなのに対し、ダム建設後のそれは145.43m³/secと大幅に増加している。その結果、農業用利水を容易に確保することができるようになり、農産物の安定供給に繋がった。さらに、河川水深の増大、河道幅の拡大によって、タイでは重要な物流手段の一つである船上交通が雨量に依存せずに可能となった。

図-9はBhumibol ダム建設前後に着目したNakhon Sawanにおける渇水、低水、平水、豊水流量の経年変化である。渇水、低水、平水流量に着目すると、ダム運用開始の1964年を境に各々の流量は顕著に増加している。また渇水、低水流量については、99%有意な増加傾向を捉えた。このようなことから、利水については極めて顕著に増加したことがわかる。

4. 数値計算による検討

本稿においては、ダム建設後も雨水が自然流下するとどのような流況を示すのかを数値計算により明らかにし、観測データと比較することで、ダムの持つ利水・治水効果を検討するため、ダム操作は考慮せずに降雨-流出過程の再現を行った。

(1) 降雨流出モデル

降雨流出計算に当たっては、まず、1:250,000の地図地形データを基に、Chao Phraya 川全流域を73のサブ流域に分割した。本研究で使用了降雨流出モデルはデンマーク工科大学が開発した集中型概念モデル(Nedbor-Afstromnings Model)である¹¹⁾。これは流出成分(地表流、中間流、基底流)を個別の貯留における含水量の関数として計算するものである。

入力値となる降水量は、流域に存在するタイ王立灌漑局やタイ気象局の持つ873観測所の日降雨データからサブ流域毎にティーセン分割し、流域平均雨量を算出した。また蒸発量は、流域内にはタイ気象局が観測している27箇所のデータがあり、その観測開始が概ね1975年からであるため、1975年から2000年までの各観測所の日平均蒸発量を算出し、雨量と同様にティーセン分割し、年による大幅な差は無かったため、計算期間中は毎年同じ値を利用した。

(2) 河道計算：基礎式と計算条件

河道計算に用いた河道網は図-2 中の黒太線である。河道網の流況再現では連続式及び不定流の基本式（サン・ヴナン式）を用いて計算している。連続式および運動量保存式を式(1)と式(2)にそれぞれ示す。なお、 $A(\text{m}^2)$ ：通水断面積、 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ ：流量、 $q(\text{m}^3/\text{s})$ ：側方流入流量、 α ：エネルギー補正係数(1.0)、 $h(\text{m})$ ：水深、 g ：重力加速度、 n ：Manning の粗度係数、 $R(\text{m})$ ：径深である。水位計算点と流量計算点を交互に配置するスタッカート法で差分化し、陰解法6点アボットスキームによって解いている。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \cdots (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \cdots (2)$$

下流端境界条件は河口から約 40km 上流に位置する C.12 水位観測所の水位の時系列を与えた。また、これまでにタイ王立灌漑局によって測定された 176 箇所の断面形状を利用している。

最初にモデルの再現性について言及する。降雨流出モデルパラメータの同定は、ダム建設前である 1957 年から 1963 年の流量を基に、図-10 の土地利用を考慮して行った。図-10 は「Statistics Yearbook」, 「Agricultural Statistics of Thailand」と「Agricultural Census Report 1963」を基にして作成した北部地域の土地利用の経年変化である。森林面積が減少傾向にあるものの、Chao Phraya 川流域は「北部地域」のうち 62.9%の面積を占めていること、さらに森林の多くは流域外であることを鑑みると、流域内の森林面積はほぼ横ばいであったことと考えられる。また、他の土地利用についても、計算期間においてはほぼ横ばいである。以上のことから、計算期間 16 年間について、土地利用の変化が微小であることから、降雨流出モデルのパラメータは変化させていない。

(3) 解析結果

図-11 は Nakhon Sawan における 1956 年 4 月 1 日から 1970 年 3 月 31 日までの降水量と流量の観測値と流量の再現計算の結果である。まずダム建設前である 1963 年以前の実測値と計算値を比較すると、再現性が高いことがわかる。次に 1964 年以降の実測値を計算値のハイドログラフを比較すると、特に低水部分において計算値の方が下回っている。流量の実測値はダムの操作を受けたものであり、低水部が上昇しているのに対し、計算値はダムが考慮されていないので、乾期においては流量が $0\text{m}^3/\text{sec}$ 達している期間もある。

図-12 は Nakhon Sawan における 1956 年 4 月 1 日から 1970 年 3 月 31 日までの水位の観測値と再現計算の結

果である。流量と同様にダム建設前である 1963 年以前における、実測値と計算値は良く一致している。そして、ダム建設後の水位を比較すると、流量と同様に、乾期において計算値の方が実測値よりも低下している。これもまたダムの運用に依るものと言える。

5. 結言

本稿では、タイ王国最大の流域面積を持つ Chao Phraya 川流域において、同国最大級の Bhumibol ダムが下流へ及ぼす利水・治水効果について検討を行った。その結果、利水については極めて顕著にその効果があることがわかった。一方、治水効果については、解析期間中に大規模洪水が発生していなかったため、厳密な評価をすることはできなかった。

今後、ダム操作を反映させた再現計算を行うと共に、同流域内に位置する Sirikit ダムも併せて、それらの効果を定量的に評価したい。

謝辞：本研究は科学技術振興事業団・戦略的基礎研究推進事業「社会変動と水循環の相互作用評価モデルの構築」（代表：寶馨京都大学防災研究所教授）の成果の一部である。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 池淵周一：水資源工学，森北出版，286pp，2001.
- 2) 竹門康弘：ダムの自然環境への影響評価について，河川，No.695，pp.3-5，2004.
- 3) 佐山實：世界のダム事情，河川，No.683，pp.36-43，2003.
- 4) 秋葉雅章・腰塚雄太・宮本守・戸谷英雄・佐藤直良・山田正：洪水特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究，河川技術論文集，第 10 巻，pp.89-94，2004.
- 5) 室田明・江藤剛治：利水を目的とした貯水池の貯留・調整機能に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 222 号，pp.57-67，1974.
- 6) Little, J.D.C. (1955): The use of storage water in a hydroelectric system, Journal of Operations Research Society of America, Vol. 3, pp. 187-197.
- 7) 高埴琢馬・池淵周一・小尻利治：水量制御からみたダム群のシステム設計に関する DP 論的研究，土木学会論文報告集，第 241 号，pp. 30-50，1975.
- 8) 高埴琢馬・堀智晴・荒木千博：貯水池操作支援システム総合化のためのダム操作規則参照用推論エンジンの設計，水工学論文集，第 40 巻，pp. 57-62，1996.
- 9) 手計太一・吉谷純一・Chanchai Suvanpimol：タイ王国・Chao Phraya 川流域における大ダム建設が下流の流況に与えた影響，水工学論文集，第 48 巻，pp.481-486，2004.
- 10) 手計太一・吉谷純一：大ダム建設が流況に与えた影響—タイ王国・Chao Phraya 川流域を対象として—，水文・水資源学会誌，受理.
- 11) Refsgaard, J.C. and J. Knudsen: Operational validation and intercomparison of different types of hydrological model, Water Resources Research, Vol.32, No.7, pp.2189-2202, 1996.

(2004.9.30 受付)