大規模ダム貯水池操作が河川流況に与える影響 に関する数値実験

手計 太一¹・道谷 健太郎²・下坂 将史³・吉谷 純一⁴

¹正会員 富山県立大学大学院准教授 工学研究科 (〒939-0362 富山県射水市黒河5180)

E-mail: tebakari@pu-toyama.ac.jp

²学生会員 富山県立大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒939-0362 富山県射水市黒河5180)

E-mail: t557008@st.pu-toyama.ac.jp

³学生会員 富山県立大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒939-0362 富山県射水市黒河5180)

E-mail: mshimosaka@hitechs.co.jp

⁴正会員 京都大学防災研究所特定教授 防災公共政策分野 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: yoshitani@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究の目的は、大規模ダム貯水池が下流の河川流況に与える影響を明らかにすることである。本研究では、タイ国の約1/3の面積を占め、社会経済的に最も重要なChao Phraya川流域を対象とした。本対象流域には、Bhumibolダム貯水池(最大貯水容量135億m³)とSirikitダム貯水池(最大貯水容量105億m³)があり、下流の治水、利水、環境を担っている。

Chao Phraya川流域を対象として、1次元不定流計算により、Bhumibolダム貯水池とSirikitダム貯水池からの放流量変動が下流の流況に与える影響について数値実験を行った。その結果、両大規模ダム貯水池からの放流量変動は、300~400 km程度までその周波数特性が保存されることがわかった。

Key Words : river discharge, spectrum analysis, numerical simulation, the Chao Phraya River basin, Thailand, human activity

1. はじめに

ダム貯水池の建設や運用は流域の河川流況に大きな影響を及ぼしていることは、長期的な河川流量データが揃いつつある昨今、その重要性が明らかになっている。特に河川環境・生態系への影響は極めて大きいことは自明であり、その影響範囲を明らかにすることは極めて重要である。

堰やダム、分水路や放水路の建設やそれらの運用によって、直接的に河川流量はコントロールされ、特に河川生態系への影響が大きいことは指摘されている¹⁾。我が国のダム貯水池は容量が小さいために、多くのダムでは洪水ピークの約30%のカットを行う程度しかできないのが実情である。一方で、グランドキャニオンダムのような大陸の大規模ダム貯水池では極めて顕著な流況変化が現れていることを示している。

世界中のダムの建設が急激に増加した1950年代から約60年経った現在、ダムの建設や運用が河川へのよ

うな影響を及ぼしていたかが明らかにされている。例えば、バイカル山脈に端を発し、シベリアを通り北極海へ流れるLena川流域を対象として、1936年から1999年という長期の月流量データの変化を調べ、その経年変化が人間活動に因る影響を受けているのか、それとも自然の変化なのかを解析した事例がある²⁾。その結果、発電施設の建設をした場所より下流では、顕著な流況の変化を捉えている。対象流域では融雪出水もあり、気候の影響を受けることで自然に流況が変化していることも示している。

さらに、ダム下流における流量調節の影響範囲を予測するために自然流況とダムを考慮した流況を比較することで、ピーク流量に対するダムの影響を検討した例もある³⁾。グローバルな視点から貯水池操作が河川流量に与える影響を定量的に評価した研究もある^{4),5)}。衛星データを利用して貯水池の貯水量をモニタリングすることは既存の貯水池の効率運用や環境影響評価に重要であることはすでに指摘されている⁶⁾。

図-1 タイ国と Chao Phraya 川流域の概略図。

表-1 Bhumibol ダムと Sirikit ダムの諸元。

Item	Bhumibol Reservoir	Sirikit Reservoir
River	Ping	Nan
Purpose	Irrigation Power generation Flood control Navigation	Irrigation Power generation Flood control Navigation
Drainage Area	26386 sq.km	13130 sq.km
Annual Inflow	5256 MCM 199.2 mm	5600 MCM 427.5 mm
Storage Maximum W.L.	13462 MCM	10508 MCM
Reservoir Surface Area	316 sq.km	260 sq.km
Dam Type	Gravity arch	Earthfill

2011 年にタイ国 Chao Phraya 川流域において発生した同国史上最悪の洪水氾濫とその被害は、同国のみならず世界各国の経済へも大きな影響を与えた。同流域には 2 基の 100 億 m^3 級の大規模ダム貯水池があったものの、当時の運用が適切だったのかについては議論が残っている。また、当該ダムからの放流による効果は 300~400 km 下流地点でのみ評価されているのが実情であり、その間の流況は評価されていない。灌漑化されてない地域では、本川からの取水に依存するため、上流からの放流操作は農業形態に大きく影響している。

Chao Phraya 川流域においては、大規模ダム貯水池の放流量変動が下流 300~400 km においてもその影響が伝播する可能性が高いことがわかっているものの^{7,8,9}、そのメカニズムはまだわかっていない。対象流域のような大河川流域における観測所は限られており、ダム放流量の影響範囲を観測データだけから明らかにすることは困難である。そこで、本研究では数値実験を利用して、Chao Phraya 川流域の大規模ダム貯水池からの放流量変動がどの程度下流にまで伝播するのかを明らかにする。

図-2 Bhumibol ダム貯水池と Sirikit ダム貯水池からの放流量の時系列。

図-3 1992 年 2 月 1 日から 3 月 31 日までにおける Bhumibol ダムからの放流量の時系列。

2. Chao Phraya 川流域

本研究で対象とした Chao Phraya 川流域の流域面積は 157,925 km^2 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 (図-1 参照)。Chao Phraya 川流域は、上流から Ping 川、Wang 川、Yom 川、Nan 川の 4 つの支川が Nakhon Sawan 市で合流し、さらにその下流において Pasak 川と Sakae Krang 川が合流し、タイ湾に注がれる。流域全体の平均降水量は年間 1200 mm 程度、かつ蒸発量が極めて多いため年間の流出高は約 200~300 mm である。

本対象流域には大・中規模のダム貯水池が 7 つ運用されているが、その中でも最大規模の Bhumibol ダム貯水池 (貯水容量: 135 億 m^3) と Sirikit ダム貯水池 (貯水容量: 105 億 m^3) からの放流量が下流の流況に与えた影響を数値実験で明らかにする。両ダムの諸元を表-1 に示す。この二つのダム貯水池は、下流域の広大な農地への水供給を行っており、同国の社会・経済を支える極めて重要な社会基盤施設の一つである。

図-4 (a) 1956～1963 年と (b) 1964～2001 年までの C.2 水文観測所 (Nakhon Sawan 市) におけるハイドログラフ。

表-2 擬似河道を利用した数値実験の実験条件.

CASE	河幅W (m)	河川長 (km)	粗度係数 n	河床勾配 i	ピーク流量Q (CBM/s)	低水流量Q (CBM/s)
CASE1	200	5000	0.03	1/1450	400	160
CASE2	500	5000	0.03	1/1450	400	160
CASE3	1000	5000	0.03	1/1450	400	160
CASE4	10000	5000	0.03	1/1450	400	160

3. 大規模ダム貯水池の建設・運用が下流の流況に与えた影響の実態

本研究対象としているタイ国 Chao Phraya 川流域における大規模ダム貯水池の建設・運用が下流の流況に与えている影響の実態は既報⁹⁾の通りであるので詳細については割愛するが、ここでは、河川流量データの周波数特性について記載する。

図-2 は Bhumibol ダム貯水池と Sirikit ダム貯水池からの放流量の時系列を示している。Bhumibol ダム貯水池は 1964 年 6 月 1 日より、Sirikit ダム貯水池は 1974 年 1 月 1 日より現在に至るまで運用されている。両ダム貯水池ともに、乾期にあたる 1 月～6 月の 6 ヶ月間、週単位で決められた水量を放流している。また、最低放流量も規定されている。図-2 を拡大して 1992 年 2 月 1 日から 3 月 31 日までにおける Bhumibol ダムからの放流量の時系列を図-3 に示す。この図からも週単位で放流していることが一見してわかる。乾期においては、このような放流量変動が続いている。一方、雨期においては基本的に流入量相当を放流している。

これらの影響は両ダムより約 350 km 下流にある C.2 水文観測所 (Nakhon Sawan 市) の河川流量データにも表れている。図-4 は 1956 年から 2001 年までの C.2 水文観測所 (Nakhon Sawan 市) における各年のハイドログラフを示したものである。Bhumibol ダム貯水池が建設された 1964 年以降の 1 月から 6 月の期間において、短い規則的な変動が見られる。一方で、1964 年以前においては上述したような変動は確認できない。このことから、ダム貯水池建設・運用が下流の流況に影響を与えているこ

図-5 Bhumibol, Sirikit ダム貯水池からの日放流量と C.2 水文観測所における河川流量の時系列データのパワースペクトル。

とが推察できる。

これまでに、水文量にスペクトル解析を適用し降水量と河川流量との関係を導く検討¹⁰⁾や各種水文量の時系列データに適用することで周期成分を明らかにし、その統計的有意性を評価する研究¹¹⁾や長江の河川流量の年間変動特性を明らかにするためにパワースペクトルが利用されている¹²⁾。また、我が国の代表的な 15 河川の日流量データのスペクトル特性を明らかにし、水資源計画へ利用可能性を検討している¹³⁾。著者らは既に本研究対象流域における河川流量のスペクトル特性について報告している¹⁴⁾。本稿では数値実験結果との比較がわかりやすいように、図-2 と図-4 の時系列データを利用してそれぞ

図-6 大規模ダム貯水池を考慮しない場合における C.2 水文観測所の日河川流量時系列のパワースペクトル。

図-7 大規模ダム貯水池を考慮した場合における C.2 水文観測所の日河川流量時系列のパワースペクトル。

れのパワースペクトルを算出した結果を図-5 に示す。図中上段より Bhumibol ダム貯水池からの放流量、中段は Sirikit ダム貯水池からの放流量、下段は C.2 水文観測所における河川流量のパワースペクトルを示している。いずれにおいても、365 日年周期が認められる。さらに、高周波域において 7 日の周期成分が検出されている。Bhumibol と Sirikit ダム貯水池からの放流は前述したように週単位で規定されていることから、このような 7 日という周期成分が検出されたと考えられる。また、両ダムより約 350 km 下流に位置する C.2 水文観測所においても同様に 7 日という周期成分が検出されていることから、ダム放流量の影響と考えられる。

4. 数値実験の方法

前章で詳述したように、本対象流域の河川流量データからダム放流の影響と推察される周期成分が検出されている。

本章では、数値実験を利用することで河川縦断方向にダム放流量の影響を検討した。まず、自然河川流域と仮定した場合と実際のダム貯水池運用を考慮した場合を実際の河道網を利用した数値実験を行った。次に、擬似的に単断面河川を作成し、周期特性はどの程度の河川長まで伝播するのかを検討した。

(1) 実河道網を利用した数値実験

降雨流出計算に当たっては、Chao Phraya 川全流域を 58 のサブ流域に分割し、それぞれにタンクモデル型の降雨・流出モデルを配した。

河道計算に用いた河道網は図-1 中の青太線で示す。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。水位計算点と流量計算点を交互に配置するスタッガート法で差分化し、陰解法 6 点アボットスキームによって解いている。

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

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

なお、 $A(m^2)$:通水断面積、 $Q(m^3/s)$:流量、 $q(m^3/s)$:側方流入流量、 α :エネルギー補正係数、 $h(m)$:水深、 g :重力加速度、 n :Manning の粗度係数、 $R(m)$:径深である。

下流端境界条件は Chao Phraya 川の河口から約 40 km 上流に位置する C.12 水文観測所と Tha Chin 川の河口から約 50 km 上流に位置する T.1 水文観測所（図-1 参照）の水位の時系列を与えた。本研究では、リファレンスポイントを下流端よりも 200 km 以上上流にある C.2 水文観測所（図-1 参照）に設定したので、下流端の影響は全く

図-8 1988年4月1日～1993年3月31日までの Ping 川縦断方向各地点における河川流量のパワースペクトル。

受けない。いわゆる開放端条件と同条件である。さらに、これまでにタイ王立灌漑局(RID)によって測定された 176 箇所の横断面形状をモデルに入力している。

本実験においては、実際の二つのダム貯水池からの放流量データを利用して計算している。なお、紙面の都合上、本稿で利用する数値モデルの詳細な構造や精度については既報を参照されたい^{15),16)}。

(2) 擬似河道を利用した数値実験

図-3 は Bhumibol ダム貯水池からの日放流量データの一部を示している。ここでは擬似的に直線の単断面河道を作成し、前項に示した河道計算法を利用して下記(3)式に示す擬似的な放流量変動が伝播する様子を明らかにした。

$$Q_{\text{release}} = 160 + 240 \left| \sin \left(\frac{\pi}{7} t \right) \right| \quad (3)$$

ここで、 Q_{release} は放流量(m^3/s)、 t は時間(日)である。

この擬似的な放流量変動は、図-3の実際のダム放流量変動を模したものである。また、実験条件は表-2の通りである。低水流量は、乾期において実際にBhumibolダムからの規定の最低放流量である $160 \text{ m}^3/\text{s}$ 、ピーク流量は平

図-9 1974年1月1日～1996年3月31日までの Nan 川縦断方向各地点における河川流量のパワースペクトル。

均放流量を基に設定した。

5. 解析結果

(1) 実河道網を利用した数値実験の結果

図-6 は Bhumibol, Sirikit ダム貯水池を考慮しない場合、図-7 は Bhumibol, Sirikit ダム貯水池を考慮した場合における C2 水文観測所の日河川流量時系列のパワースペクトルを年代毎に示す。なお、C2 水文観測所は Bhumibol ダム貯水池より 327 km 下流、Sirikit ダム貯水池より 391 km 下流に位置している。

図-6 と図-7 を比較すると、ダム貯水池を考慮した場合の数値実験結果において、二つのダム貯水池が建設された 1971 年以降、顕著な 7 日の周波特性が確認できる。これは河川流量の観測データを基にした解析結果とも一致することから、ダム貯水池から 300～400 km 程度下流においても日放流量時系列データの周波数特性は保存されることが明らかになった。また、大規模ダム貯水池の数が増加すればその影響も増大すると推察される。

図-8 は 1988 年 4 月 1 日から 1993 年 3 月 31 日までの Ping 川縦断方向各地点における河川流量のパワースペクトルである。図中上段は Bhumibol ダム貯水池より約 65 km 下流に位置し Wang 川と合流する地点、二段目は約 117 km 下流、三段目は約 254 km 下流、四段目は 298 km 下流、最下段は C2 水文観測所を位置している。いずれ

図-10 擬似河道網を利用した数値実験 (CASE1) の結果の一例。

も年周期特性が確認されるとともに、高周波域に7日周期特性が認められる。上流から下流に至るまでその周期特性は保存されたまま伝播されている。図-9は1974年1月1日から1996年3月31日までのNan川縦断方向各地点における河川流量のパワースペクトルである。上段図より下段図に従って、上流から下流を示すものである。この図においても、高周波域に7日周期特性が検出された。Sirikitダム貯水池からの放流量変動は下流に伝播された様子が窺える。

Ping川ほど顕著でない理由は、中規模の支川流域が多いことが挙げられる。それらのほとんどは自然河川に近い状態であり、ダム貯水池からの放流量変動を打ち消しているものと考えられる。

(2) 擬似河道を利用した数値実験の結果

図-10に擬似河道を利用した数値実験 (CASE1) の結果の一例を示す。計算条件は、河道幅200 m、河床勾配1/1450、Manningの粗度係数 n は0.03、ピーク流量 $400 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、低水流量 $160 \text{ m}^3/\text{sec}$ である。図中の黒実線は初期ハイドログラフ、赤実線は500 km下流地点のハイドログラフ、青実線は1,000 km下流地点のハイドログラフである。制御されたダム放流量変動は初期ハイドログラフの波形を維持したまま伝播していく様子が見えてくる。支川等の流入がない限りは、このように放流量変動が下流に伝播する。一般に、このような放流量変動は、水深や河床勾配、断面変化率などが強く影響する。実際のChao Phraya川の断面変化率は小さく、河床勾配は極端に緩やかではなく、水深が大きい箇所があるため、上流からの放流量変動は、上述のような理想的な伝播をしていると考えられる。

図-11は図-10と同様に擬似河道を利用した数値実験の結果、時間と距離そして河川流量の関係を濃淡図で示している。川幅の計算条件は、それぞれ500 m、10,000 mである。また、いずれの数値実験においても、粗度係数は0.03、水路勾配は1/1450である。同上条件はChao Phraya川

図-11 擬似河道を利用した数値実験の結果、時間と河道距離そして河川流量の関係。

の平均的な値である。5,000 kmという長距離になれば初期条件の放流量変動の減衰が若干認められるものの、周期特性は保存されている。先の数値実験の結果と同様に、Chao Phraya川の河川長程度であればダム貯水池からの放流量変動が下流に伝播し、流況に影響を与えていることは明らかである。

図-12は図-11の数値実験の結果を利用して河川縦断方向における河川流量データのワースペクトルを示したものである。図-10において前述したように、放流量変動の伝播は水深が影響するため、川幅が大きくなれば水深は小さくなり、周期特性が明瞭でなくなっていくことがわかる。本研究対象としたChao Phraya川は大規模河川

図-12 擬似河道（川幅 200m と 10000m）利用した数値実験結果における河川縦断方向の河川流量データのパワースペクトル。

ながらも川幅はそれほど大きくないため、放流量変動が約400kmまで伝播したと考えられる。

6. 結論

大規模ダム貯水池の放流量変動が下流の流況に与える影響について数値実験を行った。本研究では、極端な緩流河川を対象としているため、第4章で詳述したように運動方程式の全ての項を省くことのない **Dynamic Wave** 方程式を用いている。サン・ヴナン式の一般的な近似では、洪水波は減衰することなく進行する問題があり、本研究には適していない。最近では、山崎ら(2015)が陰解法で洪水シミュレーションを行うには局所慣性方程式が適当であると報告している¹⁷⁾。

また、本数値計算では、有限差分法を用いているため、数値拡散によるピーク水位の減少や数値振動の発生が懸念される。

しかしながら、計算結果の一例として示した図-10からもわかるように、初期値として与えた波形が滑らかであるため、概ね良好な計算結果であると評価できる。その結果、大規模ダム貯水池からの放流量変動は 300～400km 程度までその周波数特性を保存されることがわかった。著者らによる観測流量データを使用した研究結果

とも良く一致した。

最後に、周波数解析を利用して、収集した河川流量や水位データの品質検査にも有用であると考えられる。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費15H05222の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小倉紀雄, 山本晃一：自然的擾乱・人為的インパクトと河川生態系, 技報堂出版, 362pp, 2005.
- 2) Ye, B., D. Yang and D. L. Kane: Change in Lene River streamflow hydrology: Human impacts versus natural variation, *Water Resour. Res.*, 39(7), 1200, doi: 10.1029/2003WR001991, 2003.
- 3) Gross, E.J. and Moglen, G.E.: Estimating the hydrological influence of Maryland state dams using GIS and the HEC-1 model, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol.12, No.6, pp.690-693, 2007.
- 4) 花崎直太, 鼎信次郎, 沖大幹：貯水池操作が全球の河川流量に与える影響の評価, *水工学論文集*, 第48巻, pp.463-468, 2004.
- 5) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T.: A Global river discharge simulation taking into account water withdrawal and reservoir operations, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 24-2, 53-63, 2006.
- 6) 馬籠純, 竹内邦良, 平野順子, 石平博：大規模貯水池における貯水量変化の衛星モニタリング, *水工学論文集*, 第48巻, pp.103-108, 2004.

- 7) 沖大幹：GAME-T の経緯と今後の課題，気象研究ノート，第 202 号，pp.271-301, 2002.
- 8) 沖大幹：降雨のスペクトル特性，スペクトル解析ハンドブック，pp.261-266, 2004.
- 9) 手計太一，吉谷純一：大ダム建設が流況に与えた影響ータイ王国・Chao Phraya 川流域を対象としてー，水文・水資源学会誌，第18巻3号，pp.281-292, 2005.
- 10) Froidevaux, R. and Krummenacher, R.: Analyse spectrale des pre'cipitations et de' bits mensuels dans un bassin karstique du Jura franccais, *J. of Hydrol.*, Vol.29, No.3/4, pp.293-313, 1976.
- 11) Rao, A.R. and Hamed, K.: Multi-taper method of analysis of periodicities in hydrologic data, *J. of Hydrol.*, Vol.279, No.1/4, pp.125-143, 2003.
- 12) Wang, G., Jiang, T., Blender, R. and Fraedr, I.K.: Yangtze 1/f discharge variability and the interacting river-lake system, *J. of Hydrol.*, Vol.351, No.1-2, pp.230-237, 2008.
- 13) 近森邦英：河川日流量スペクトルの特性について，農業土木学科論文集，第79号，pp.10-16, 1979.
- 14) Tebakari, T., Yoshitani, J. and Suvanpimol, P: Impact of large-scale reservoir operation on flow regime in the Chao Phraya River basin, Thailand, *Hydrological Processes*, 26, pp.2411-2420, 2012. DOI: 10.1002/hyp.9345
- 15) 手計太一，吉谷純一，チャンチャイ・スヴァンピモル，宮本守，山田正：MIKE11 を利用したタイ王国・Chao Phraya 川流域水循環モデルの構築とその検証，水文・水資源学会誌，第 19 巻 3 号，pp.212-220, 2006.
- 16) 手計太一，吉谷純一，チャンチャイ・スヴァンピモル，宮本守，山田正：数値実験を利用した大ダムの持つ治水・利水効果の検証ータイ王国・Chao Phraya 川流域を対象としてー，水文・水資源学会誌，第 20 巻 3 号，pp.145-155, 2007.
- 17) 山崎大，田中智大，Paul D. Bates：局所慣性方程式の導入による洪水氾濫計算の安定化と高速化，水文・水資源学会誌，第 28 巻 3 号，pp.124-130, 2015.

(2015. 4. 7 受付)

NUMERICAL SIMULATION FOR THE IMPACT OF LARGE SCALE RESERVOIR OPERATION ON RIVER FLOW REGIME

Taichi TEBAKARI, Kentaro DOTANI, Masashi SHIMOSAKA and Junichi YOSHITANI

The purpose of this study is to clarify the effect of reservoir operation on the flow regime in the lower watershed using numerical simulation. Using the simulated river discharge data, the spectrum characteristics of river discharge data was studied.

As a result of numerical simulation, The spectrum of daily discharges available information was analyzed by using the fast Fourier Transform for daily discharges in Nakhon Sawan city and immediately downstream the Bhumibol reservoir. The river flow in Nakhon Sawan city has a periodic characteristic of 7-days, and the released water from the Bhumibol and Sirikit reservoir' have a periodic characteristic of 7-days. The reservoir operations affected the hydrological cycles considerably. Two large scale reservoirs have been affected to the flow regime in the lower Chao Phraya River basin of Thailand using the historical discharge data. As mentioned above, the river flow regime at least around 400km downstream large scale reservoir could be affected by the reservoir operation.