

水力発電設備の持続的使用を目的としたダム湖土砂管理 ー貯水池式発電所ダム湖における堆砂進行が発電運用に及ぼす影響ー

Reservoir Sedimentation Management for Hydropower Plant Sustainability - Influence of Sedimentation Progress in Storage Reservoirs on Hydropower Plant Operation -

奥村裕史⁽¹⁾・角 哲也

Hirofumi OKUMURA⁽¹⁾, Tetsuya SUMI

(1) 電源開発株式会社 土木建築部 土木技術室

(1) Electric Power Development Co., Ltd. Civil Engineering Office, Civil & Architectural Engineering Dept.

Synopsis

Reservoir sedimentation is one of the most important problems for securing long term achievement of hydropower plant operation in the future. We have already classified the sedimentation problems regarding the reservoir types and proposed effective sediment control measures for regulating reservoirs. On the other hand, sedimentation problems in storage reservoirs need to be more studied. In this paper, we have evaluated the influence of sedimentation progress in storage reservoirs on power generation by analyzing long-term operation record. Finally, future influence of reservoir sedimentation was predicted from the viewpoints of changing active storage capacity, inflow water regime and the maximum hydropower discharge.

キーワード: 水力発電所, 堆砂, 貯水池, 水使用率

Keywords: hydropower plant, reservoir sedimentation, storage reservoir, water use efficiency

1. はじめに

既設水力発電設備を持続的に使用していくにあたり, 最重要課題の1つはダム湖における堆砂対策である。水力発電用設備は, Fig. 1に示すとおり河川にシリーズで設置され, そのうちダム湖は発電方式・役割の違いによって, 河川上流に設置する貯水池(貯水池式発電所)とその下流に設置する調整池(調整池式発電所)とに分けられる(千秋, 1967)。著者らは既に, 発電用ダム湖を貯水池と調整池とに分け, ダム湖における堆砂問題について分析を行った(奥村・角, 2010)。その結果, 貯水池よりも調整池において, ダム湖周辺の浸水被害リスク軽減を目的と

する堆砂対策の実施が必要であることを明らかにした。さらに著者らは, Fig. 2に示すとおり, 調整池が有する特性である, 上流貯水池からの水補給を受けることが可能であること, ダム高に対して洪水吐の規模が大きいこと等を利用し, 池タイプ, 中間タイプ, 川タイプの3つのタイプの調整池それぞれに適した有効な堆砂対策を提案した(奥村・角, 2010; 奥村・角, 2011)。その対策内容は, 基本的に出水時にダム水位を低下させ, スルーシング排砂を主とする方法によるものである。

一方, 調整池の上流側に位置する貯水池については, 周辺に社会資本が少ないこと, 利用水深が大きく堆砂が満水位近くの高い位置に生じる割合が小さ

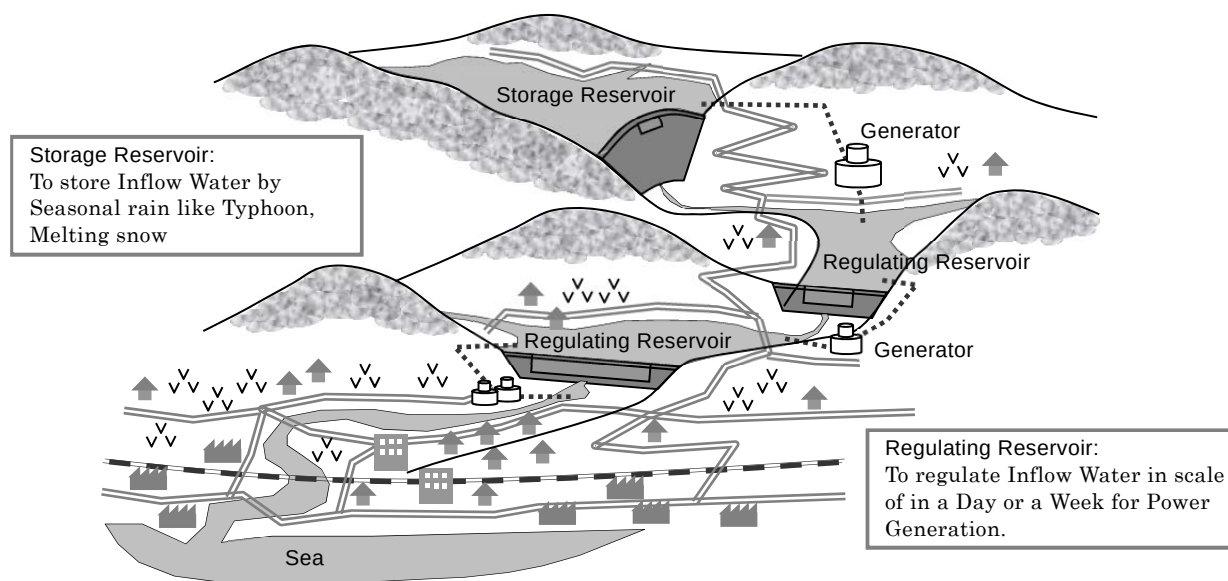


Fig.1 Location and Position of Hydropower Plants

いため河床上昇にともなう出水時水位の上昇の程度が小さいこと等から、調整池に比較して一般に浸水被害リスクは小さく、貯水池の堆砂対策の必要性は小さい（奥村・角，2010）。しかしながら、堆砂は毎年進行し、貯水池の主目的である台風期や梅雨期等の流入水を貯留して、下流の水力発電施設を含めたシリーズの水力発電システムに対する季節間の流量調節を行うために必要な有効貯水容量は確実に減少している。ダム湖に流入する水量は年毎に大きく変動し、その変動に応じた貯水池運用および発電運用（水使用）を行っていることから、堆砂進行による影響のみを抽出・認識することは難しい。例えば、（社）電力土木技術協会（2005）は、発電用ダム湖について堆砂影響の調査を行ったが、堆砂進行により発電運用に支障が出ている地点は、調査対象354地点のうち、わずか6地点であると報告した。また、（社）日本大ダム会議の土砂管理分科会（2010）は、8割以上の発電用ダム湖で有効貯水容量内の堆砂率は10%未満であり、運用上の大きな問題ではない、と報告した。

本研究は、上記のような報告はあるものの、貯水池式発電所において、堆砂進行による発電運用への影響は本当に生じないのかという疑問について、長期的視点から明らかにすることを目的としている。具体的には、電源開発（株）が所有・管理する貯水池式発電所の長期間の運用実績を分析し、堆砂進行の影響を抽出するとともに、堆砂がさらに進行した場合についてシミュレーションを行い、その影響を明らかにする。

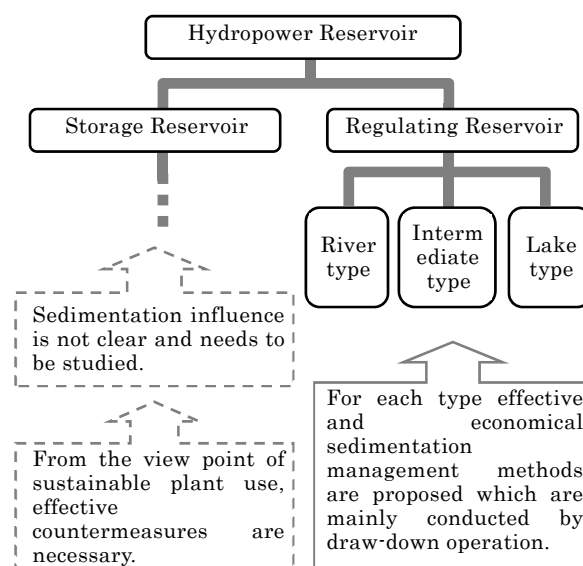


Fig.2 Sedimentation Management in Hydropower Reservoir

2. 発電運用の経年変化

Fig. 1 に示されるように河川にシリーズで設置されている水力発電システムにおいて、貯水池は季節的な流量の過不足を調節する役割を担っており、そのために大きな有効貯水容量が必要である。千秋（1967）は、貯水池の条件の1つに、「年間総流入水量の20%以上の有効貯水容量を有すること」を挙げている。これは有効貯水容量に対する年間の貯水池回転率（以下「有効貯水回転率」）が5以下である

ことを意味する。本章では、電源開発（株）が所有・管理する貯水池式発電所の発電運用の経年変化を水使用率、有効貯水回転率等の指標を基に分析を行う。

2.1 水使用率変化および有効貯水回転率との関係

Table 1 に電源開発（株）が所有・管理する A から G までの 7 つの貯水池について、堆砂進行による有効貯水回転率の発電運用開始時と 2011 年時との比較を示す。表ではダムが設置されている地域を「/」の右に示しているが、これは河川砂防技術基準（1997）の地域別比流量を求める際の地域区分に従っている。有効貯水回転率を算出するために用いた年間総流入量は 1988 年から 2011 年までの 24 年間の平均である。当初から有効貯水回転率が貯水池条件の 5 以下を満足していない地点があるが、最低限 20 以下であれば良いとする指針もある。表から全ての貯水池で堆砂進行により有効貯水容量が減少し、有効貯水回転率が大きくなっていることが分かる。

有効貯水回転率の上昇が貯水機能や発電運用にどのような影響を及ぼしているかを確認するために、式(1)に示す「水使用率」を 7 つの貯水池について算出した。一般に、有効貯水容量が減少すれば、出水時の流入水を十分貯水できず、発電機を通らないダム放流量（無効放流量）が増大すると考えられる。

$$\text{水使用率(\%)} = \frac{\text{年間発電使用水量}}{\text{年間発電使用水量} + \text{年間ダム放流量}} \quad (1)$$

算出結果を Table 2 に示す。表から、1988 年から 2011 年の間に 7 地点のうち 6 地点で堆砂が進行し、5 地点で水使用率が低下していることが分かる。B 地点は堆砂が進行しているものの、ダム放流の頻度がもともと小さく、特に 2000 年以降でダム放流が行われた年は 2 回のみであったため、水使用率がわずかに上昇した。同様に、C 地点では、2005 年から 2010 年の間に平年程度の出水・流入が生じず、ダム放流量が減少したため、水使用率が上昇する結果となった。一方、G 地点では、堆砂対策の実施により有効貯水容量内の堆砂率が減少している。以上の結果から、貯水池式発電所においては、一般的に緩やかながら貯水池有効貯水容量内の堆砂が進行しており、出水発生 の程度による流入条件の差異の影響はあるものの、概ね水使用率が低下していることが確認できる。

Fig. 3 および Fig. 4 に E 地点および D 地点の水使用率の経年変化、および年間流入水量（使用水量＋ダム放流量）と年間使用水量を示す。図中には、水使用率の回帰直線載せているが、両地点ともに低下傾向を示している。E 地点は、算出対象期間で

Table 1 Reservoir Turnover Ratio (Active Water Capacity) Original and as of 2011

Reservoir (plant) /Area	Original Active Cap. (1,000m ³)	Start of Operation	Reservoir turnover ratio (Active Cap.)	
			Original	2011
A/Hokuriku	458,000	1960	3.14	3.19
B/Hokuriku	330,000	1961	4.14	4.21
C/Kii-Nanbu	68,000	1962	4.42	4.47
D/Sikoku-Nanbu	72,500	1970	5.33	5.65
E/Hokuriku	50,000	1964	7.56	7.66
F/Kii-Nanbu	89,000	1960	12.55	13.63
G/Chubu	205,444	1956	24.98	31.97

Table 2 Secular Change of Water Use Efficiency

Res. (Plant)	Sedimentation Ratio		Water Use Efficiency	
	1988~2011 Average	1988~2011 Change*	1988~2011 Average	1988~2011 Change*
A	1.68%	0.058%/yr.	99.67%	-0.059%/yr.
B	1.59%	0.045%/yr.	99.11%	+0.035%/yr.
C	1.10%	0.066%/yr.	78.73%	+0.485%/yr.
D	5.61%	0.105%/yr.	91.22%	-0.158%/yr.
E	1.36%	0.133%/yr.	97.89%	-0.183%/yr.
F	7.94%	0.058%/yr.	78.84%	-0.104%/yr.
G	21.86%	-0.027%/yr.	89.82%	-0.125%/yr.

*change means inclination of regression line.

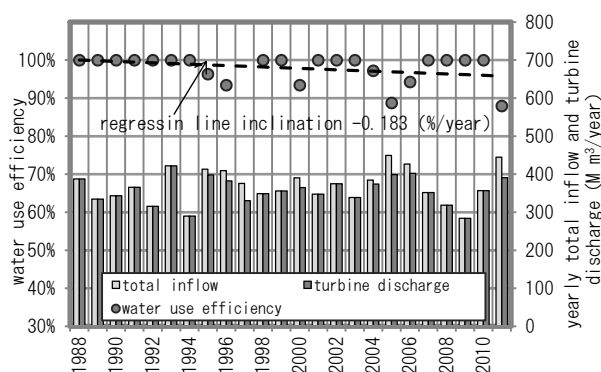


Fig. 3 Secular Change of Water Use Efficiency in Hydropower Plant E (1988-2011)

まとまった量のダム放流があったのは 7 年であり、半分以上の年で水使用率が 100%である。ダム放流があった年に水使用率が低下しているが、その低下する程度が経年的に大きくなっていることがわかる。一方、D 地点は、算出対象期間でダム放流があった

年は 16 であり、24 年間の水使用率の平均は 90% 程度である。水使用率は毎年大きく変動しているものの、E 地点と同様に徐々に低下しており、80% 以下に低下している年もある。これら 2 地点の傾向は堆砂進行による有効貯水容量減少の影響を示唆している。

水使用率の低下は、ダム放流をもたらす出水時の大きな流入とこれを調節する有効貯水容量の相対関係にあると考えられる。そこで、Fig. 5 に E 地点および D 地点の各年毎における「豊水量以上流入量合計／有効貯水容量」の値と水使用率との関係を示す。図から、「豊水量以上流入量合計／有効貯水容量」の値が大きい年に水使用率が小さくなることが分かる。このことより、適切な堆砂対策により有効貯水容量の減少を抑制する、さらに積極的に有効貯水容量の回復まで行うことができれば、出水時のダム放流量を小さくし、水使用率の低下を防ぐことができると考えられる。

出水時のダム放流と有効貯水容量の関係を考察するために、Fig. 6 に D 地点の 2005 年の出水時（最大流入量 985m³/sec）の発電運用およびダム運用の実績を示す。また、同図には有効貯水容量内堆砂率が当時の 6.4% から進行し、20% および 50% まで増加した場合の運用シミュレーション結果も示す。運用シミュレーションでは、ダム水位が実績と同程度になるようにダム放流を行っており、これが水使用率の減少の要因となっている。

Table 3 に結果を示すが、堆砂が進行するとダム放流の開始日時が早くなり、さらに最大放流量が大きくなることが分かる。特に堆砂率が大きい場合、出水初期のダム水位上昇の速さが大きくなり、それらを実績と整合させるために、堆砂率 20% および 50% のケースではダム放流量を多くする必要があった。このため、上記の 2 ケースにおいては、ダム放流量の合計が多くなる結果となった。

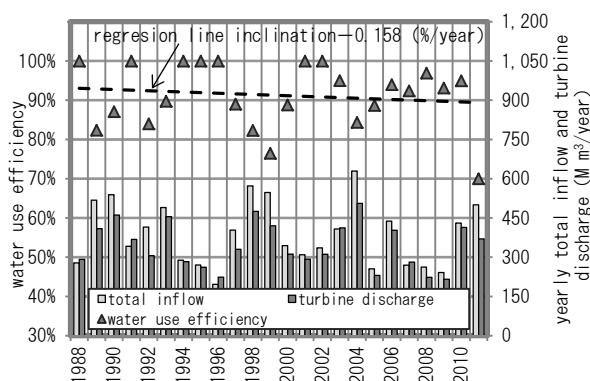


Fig. 4 Secular Change of Water Use Efficiency in Hydropower Plant D (1988-2011)

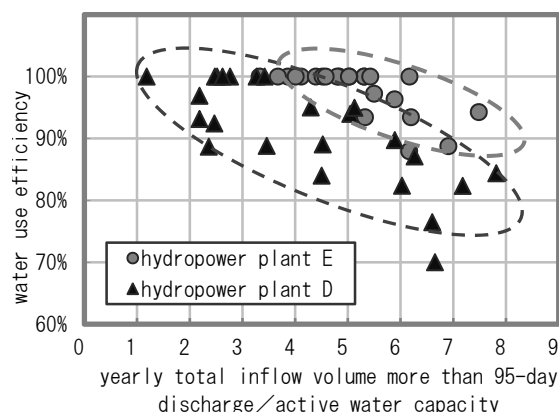


Fig. 5 Relation between Water Use Efficiency and Total Inflow Volume more than 95-day Discharge

Table 3 Summary of Comparison between Record and Simulation Result at Reservoir D

Sedimentation Ratio in Active Water Cap.	Maximum of Dam Gate Discharge	Date of Dam Spillway Gate Open	Total Volume of Dam Gate Discharge
6.4% (2005)	601m ³ /sec	2:00, 6th Sep.	29,458,000m ³
20%	670m ³ /sec	14:00, 5th Sep.	34,575,000m ³
50%	700m ³ /sec	3:00, 5th Sep.	45,800,000m ³

Average Yearly Total Inflow Volume : 384,572,000m³

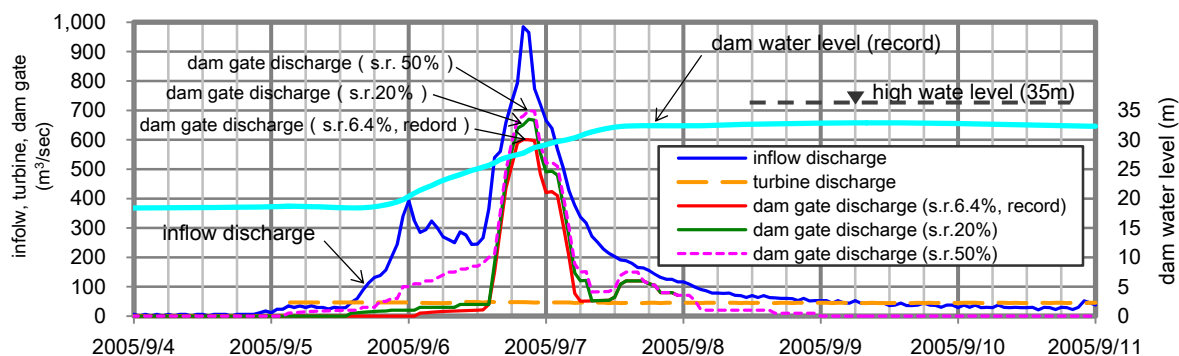


Fig. 6 Comparison of Dam Gate Discharge Condition between Record and Simulation Result at Reservoir D

2.2 水使用率と最大発電使用水量との関係

水使用率は、有効貯水容量と貯水池地点の流況との関係だけでなく、設備能力である最大発電使用水量の大小にも影響を受ける。これが大きければ有効貯水容量にあまり依存せずに水使用が確保できる。一般に水力発電設備では、流れ込み式の場合で、設置地点の流況に基づいて流量設備利用率（実際の年間発電使用水量合計／（最大使用水量×365日））が45～60%となるように計画される（新エネルギー財団，2012）。一方、貯水池式では、これにマスカープを用いた必要有効貯水池容量を加味した検討が行われている。

さらに、これらの値は、水力発電用ダム貯水池が設置されている地域の流況特性（日本海側，太平洋側など）にも大きく左右され、特に台風時のような大きな出水の影響が大きい。Fig. 7 に 1988 年から 2011 年までの間のデータを用いた E 地点と D 地点の流況特性を示す。これより明らかに D 地点の方が出水の影響が大きく、無効放流が発生しやすいことがわかる。この流況特性の違いを定量化するために、ここでは発電最大使用水量と豊水量（年間 95 日間はこれより下らない流量）を上回る流量との比率を指標として検討を行った。

Fig. 8に、各地点の年間の豊水量以上の流入量の合計（Fig. 7のハッチ範囲）を、連続95日間最大出力で発電した場合の使用水量の合計（最大使用水量×95日）で割った値と、水使用率との関係を示す。図より明らかに、これらの間には明確な相関性があり、貯水池地点の流況が水使用率に影響を与えていることが分かる。水力発電所計画時においては、最大発電使用水量と有効貯水容量とから河川利用率（最大使用水量以下で発電使用可能な水量の積算値／年間の総流入量）を算定し、経済性を検討するが、今回はこの逆の手順を行ったものである。

3. 堆砂進行が発電運用に及ぼす影響

第2章で、発電運用（水使用率）には、有効貯水回転率と最大発電使用水量が影響することを示した。本章では、それらの関係を整理し定式化を行う。

3.1 発電運用（水使用率）に影響を及ぼす要因の整理

発電運用（水使用率）に影響を及ぼす要因について、これまでの分析結果を基に整理し図化したものを Fig. 9 に示す。発電運用は、「貯水池地点の流況と有効貯水容量との関係」および「貯水池地点の流況と最大発電使用水量との関係」の影響を受ける。水力発電計画時には、これらの関係から、電力需要状況と経済性を踏まえ、発電所の仕様を検討・確定す

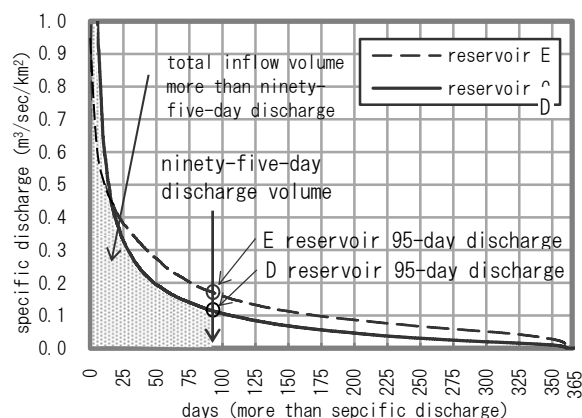


Fig.7 Inflow Regime of Reservoir E and D

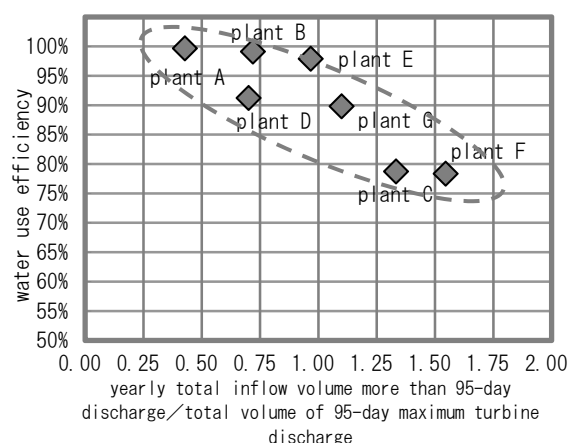


Fig.8 Relation between Water Use Efficiency and Maximum Turbine Discharge

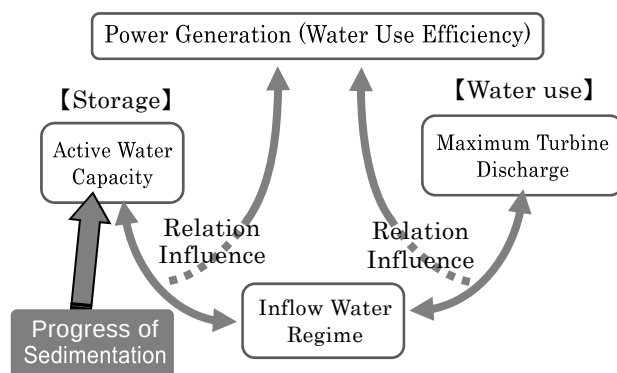


Fig.9 Conceptual Diagram of Water Use Efficiency and Factors

る（千秋，1967）。多くの貯水池は設置から数十年が経過し、計画時に考慮されなかった堆砂進行による有効貯水容量の減少が生じており、次項では、この影響を評価することが可能な関係式を導く。

3.2 発電運用（水利用率）の評価式

7つの発電所（貯水池）の発電運用実績をもとに、発電所の水利用率を「有効貯水容量と貯水池地点の流況との関係」、「最大発電使用水量と同流況との関係」から導く式を、多変量回帰分析により求める。関係式は、式(2)の通りであり、流況は、年間総流入量と出水時に特化した豊水量以上の流入量の両者を検討する。

$$\text{水利用率(\%)} = \frac{a1 \times \text{年間総流入量} + a2 \times \text{豊水量以上流入量の合計}}{\text{有効貯水容量}} + \frac{a3 \times \text{豊水量以上流入量の合計}}{95 \text{ 日間最大発電時使用水量の合計}} \quad (2)$$

重回帰分析の結果、得られた $a1 \sim a3$ の係数の値および実績との比較をTable 4に示す。A地点で水利用率が100%をわずかに超えているが、有効容量内堆砂率変化に伴う水利用率変化の傾向を求めるうえでは、問題とはならないと考えられる。相関係数は0.926であり、水利用率を評価する良好な式を得ることができた。

4. 貯水池における堆砂対策

第3章で得られた水利用率を評価する式を用いて、今後、貯水池において堆砂進行した場合に水利用率がどのように変化するかを予測を行う。また、予測結果に基づき貯水池における堆砂対策について述べる。

4.1 貯水池堆砂進行が発電運用に及ぼす影響の予測

式(2)を用いて、今後、貯水池の堆砂が進行した場合の水利用率を求めた。結果をFig. 10に示す。

図から、堆砂が進行することにより水利用率が低下し、発電運用に影響が生じることが分かる。また、同じ堆砂率まで堆砂が進行しても、発電運用に及ぼす影響の程度が地点によって異なっていることが分かる。北陸および中部地域に設置されている4つの貯水池（A地点、B地点、E地点、G地点）では、堆砂率が50%程度まで上昇しても、水利用率は殆ど変化しない。一方、紀伊南部および四国南部に設置されている3つの貯水池は、堆砂率が0%から50%程度に上昇すると水利用率が10%程度低下することとなる。特にF地点では15%程度の大幅な水利用率の低下となる。

堆砂率が10%程度までの低い範囲では、E地点、G地点、D地点の水利用率は90%程度で同じレベルにあるものの、堆砂進行にともない、D地点の水利用率が残りの2地点に比して大きく低下する。これ

Table 4 Multi Regression Analysis Result

Plant Reservoir	Coefficient	Water Use Efficiency	
		Record	Calculation
A/Hokuriku	$a1 = +0.03509$	99.67%	101.79%
B/Hokuriku		99.11%	97.50%
C/Kii-Nanbu	$a2 = -0.06467$	78.73%	84.35%
D/Sikoku-Nanbu	$a3 = -0.1183$	89.82%	91.30%
E/Hokuriku	$b = +1.065$	97.89%	92.84%
F/Kii-Nanbu		91.22%	90.91%
G/Chubu		78.34%	76.08%

Correlation Coefficient 0.926

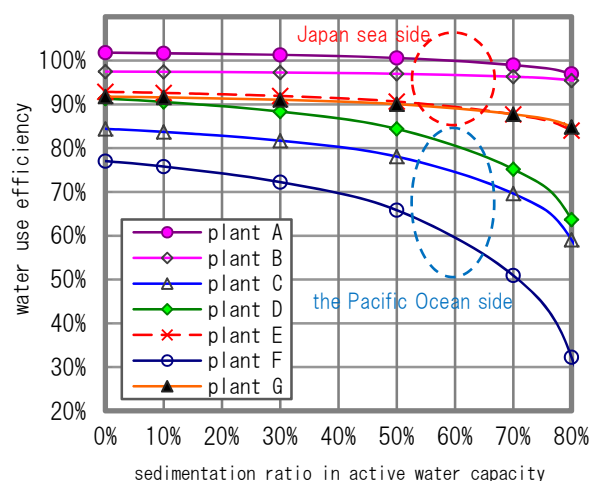


Fig.10 Prediction of Water Use Efficiency

は、堆砂進行により有効貯水容量が減少した場合に、紀伊南部や四国南部などの豊水量以上の流入量の合計が多い地域においては、貯水池運用に大きく影響するためと考えられる。一方、年間を通じて比較的平均的な流入のある北陸、中部などの地域では、有効貯水容量の減少が直ちに水利用率の低下につながるとはいえない。

第1章で述べた（社）日本大ダム会議の土砂管理分科会の報告（2010）とFig. 10に示されるシミュレーション結果とはよく整合する。水利用率は、紀伊南部および四国南部の地域において、堆砂率が30%程度に達して初めて数%程度低下する。それ以外の地域では、堆砂率70%程度になるまで、水利用率は殆ど低下しない。

この結果は、西南日本における梅雨や台風などの出水に大きく左右される水力発電用貯水池ほど、堆砂進行による有効貯水容量の減少が貯水機能に大きく影響することを示す。さらに、今後の気候変動による貯水池地点の流況の変化の影響も、より大きく受ける可能性があることを示唆している。

4.2 貯水池における堆砂対策の必要性

水力発電設備は、長期的な使用が求められており、将来的に堆砂が進行し発電運用に影響が生じることが予測されるのであれば、早期に対策を講じることが有効である。その理由は大きく2つある。1つ目の理由は、河川にシリーズで設置されている水力発電システムの最上流に位置し、貯水を期待される貯水池が、その貯水機能を低下させた場合、下流に設置されている全調整池の発電運用に影響し、大きな損失につながるからである。2つ目の理由は、貯水池は、通常大規模なダム湖であり、設置位置も山間部にあるため、一度流入した土砂の排除は浚渫による対策が行われる等、対策を要する等の困難性を伴う。さらに、排除した土砂は処分地・消費地までの輸送において、運搬距離が大きいことや運搬路の整備不足等のため困難が生じる（伴田・角，2009）。堆砂進行による発電運用への影響が生じる前に、その影響を予測し、早めに対策を講じることができれば、有効貯水容量の多くを温存することができる。

5. おわりに

本研究は、従来明確ではなかった貯水池式発電所における堆砂進行による発電運用への影響について、既設発電所の長期間の運用実績を分析し、堆砂進行の影響を抽出するとともに、堆砂がさらに進行した場合を模擬的にシミュレーションし、その影響を検討した。得られた成果は以下のとおりである。

1) 1988年から2011年の間の電源開発(株)が所有・管理する貯水池式発電所の運用実績を整理した結果、貯水池の有効貯水容量内において堆砂が進行し、発電運用における水使用率は緩やかに低下している。

2) 貯水池式発電所における水使用率は、有効貯水容量と最大発電使用水量と関連があり、堆砂進行に伴う有効貯水容量の減少により水使用率は低下する。

3) 貯水池式発電所における水使用率を、貯水池地点の流況、有効貯水容量、最大発電使用水量を用い評価する式を作成した。これにより、堆砂進行が発電運用へ及ぼす影響の予測をシミュレーションすることができる。

4) 評価式を用いた水使用率の将来予測結果によると、紀伊南部、四国南部などの梅雨や台風などによる出水が貯水池流入水量に及ぼす影響が大きい地域において、水使用率への堆砂進行の影響が大きく、対策の必要性が高い。また、それ以外の地域におい

ても、堆砂率が70%程度になると水使用率へ影響が生じる可能性がある。

本研究では、貯水池式発電所における堆砂対策の必要性について論じたが、具体的な対策方法については、浚渫、排砂バイパス、土砂吸引などの方法を水位運用の制約や経済性を考慮して検討していく必要がある。また、貯水池地点の流況は、今後の気候変動によって変化する可能性があり、最大発電使用水量の妥当性も含めて、対応の検討を進める必要がある。

参考文献

- 奥村裕史・角哲也（2010）：発電用ダム貯水池および調整池における堆砂等の特性を考慮した堆砂対策，電力土木，No.350
- 奥村裕史・角哲也（2010）：水力発電用ダム調整池における堆砂特性等を考慮した水位低下運用によるスルーシング排砂，水工学論文集第55巻，2010.
- 奥村裕史・角哲也（2011）：ダム水位低下運用と排砂バイパスを組合せた水力発電用ダム調整池堆砂対策，水工学論文集第56巻，2011.
- 建設省河川局（1997）：改訂新版 建設省河川砂防技術基準（案）同解説，計画編第12章ダム施設計画
- 新エネルギー財団（2012）：中小水力発電ガイドブック
- 千秋信一（1967）：発電水力演習，学献社
- 電力土木技術協会（2006）：水力発電用ダム堆砂に係る調査と啓発 調査報告書
- 日本大ダム会議土砂管理分科会（2012）：土砂管理分科会報告書－貯水池の土砂動態と土砂制御工法－，大ダム No.212, pp.12-129
- 伴田勝・角哲也（2009）：土砂資源マネジメントの観点によるダム堆砂リサイクル事業の検討，河川技術論文集第15巻

（論文受理日：2013年6月11日）