UDC 621.311.21

ダムの溢水利用に関する一考察

Consideration on Overflow of Dam

松原　雅美 * Masami Matsubara

I. ダムの溢水（いっすい）流量

水力発電用のダムにおいて，ダムが満水となり更に流入量が水車の使用水量を超過するときは，超過分に相当する流量をダムのゲートを開いて放流する必要がある。比較的降水量に恵まれ，かつ台風，集中豪雨あるいは融雪時等，短時間に出水が集中し，湛水池としてきょうあいな峡谷を利用せざるを得ない我が国においては，ほぼ定期的に訪れる多量の出水により，年間流入量の何割かに相当する水量をゲート放流として流失している。

第１表は我が国の各河川について，流域面積100km^{2}当たりに換算した流量の平均値を示す表であるが，平水量（６か月流量）に対して年平均流量がほぼ150％に達していることから，洪水に相当する出水の最大値も大きく，また期間も比較的長い河川の多いことが推測できる。

第１表　我が国の河川流量の平均値
Table 1. Mean flow of Japanese river

区　分	豊水量（３か月流量）95日	平水量（６か月流量）185日	低水量（９か月流量）275日	渇水量（355日流量）355日	年平均流量 —
流量(m^3/s)	6.30	3.63	2.63	1.64	5.45

水力発電所のゲート放流の期間は，基本的にはその河川の流況と発電所の使用水量から定まるが，実際には降雨が連続的か，断続的か，といった時間的分布，発電所あるいは河川の運用方針等に深く関連し，一概に想定することは難しい。

当然のことではあるが，流域面積の狭い上流部に設けられた大規模な貯水用ダムでは，ほとんど溢水を生じることはないが，下流部に下るに従って用地上の制約から貯水池の規模が制限される傾向に加えて，流域面積は広くなるため，必然的にダム放流の期間及び量は増加する。

一般に，道路ほか開発投資の関係もあって，ダムは中下流部から建設されることが多かった。中下流部の発電所で上流に規模の大きいダムが新設されると，新設ダムの洪水のカット効果により下流の水量は平均して相当量押し上げられる。このため，下流にある特に調整池が比較的小さい発電所では，ダム放流の期間が著しく増加する傾向が見受けられる。

実際に中下流部に位置し，中規模以下の調整池を持つ発電所では，年間流入量の20～25％をダムから放流し，その期間も年間60～80日に達するものもまれではない。

もちろんこの放流とすべてのエネルギーを回収することは物理的にも不可能であるが，そのごく一部でも効果的に回収できれば，エネルギー単価の高騰に悩まされている現状においてその効果は大なるものがある。

II. 溢水流量の利用

ダムに溢水が生じるのは，通常，洪水の前後，連続した降雨時，融雪時など特定の比較的短期間であって，通常の方法でこれを利用して発電することは設備利用率が低く，採算をとることが難しい。

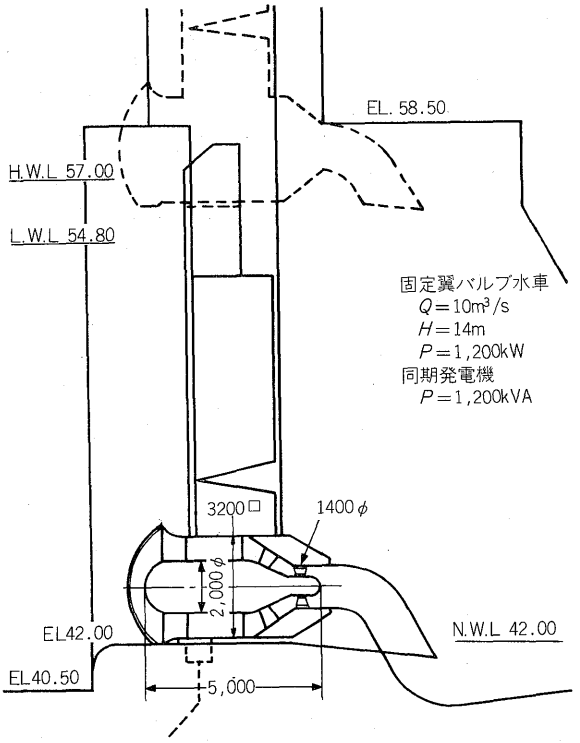
しかし，水力発電所の建設費は大部分が用地費及び仮設備費を含めた土木関係の費用であって，水車・発電機ほか電気関係の設備の費用は投資総額の10～20％程度に過ぎない。したがって，既設のダムのダム満水時の湛水水位とゲート下端の間の水頭に着目し，小形のバルブ水車・発電機を直接ゲートを貫通して設置，ゲート床面（ダムクレスト）に放水せしめるようにする。すなわち，主として電気設備を追加すれば，土木設備としてはゲート関係ほか一部の改修を行うだけで，既設設備の機能を活用することにより極めて効果的な発電が可能となる。

例えば，第１図に示すように小形化，軽量化を図ったバルブ水車・発電機をゲートに取り付けると，洪水時はゲートとともに水車・発電機も巻き上げられるため，放流床面には障害物を残すことなく，洪水の放流に支障を生じるおそれは全く生じない。

このため，ゲートに取り付けるバルブ水車・発電機としては当然，重量及び寸法に厳しい制限を受けることになる。更に据付場所が常時点検を行うには極めて不便な場所であるため，保守はできるだけ簡単な，メンテナンスフリーの機能を備えた信頼度の高い性能を要求される。反面，設備利用率の低いにもかかわらず経済効果を保持するためには，構成の簡素化ほか，合理化によって徹底したコストダウンを図る必要がある。

当然ではあるが，ゲートに直接取り付けるためにはユニットは小さい方が容易である。しかし，あまり小さいと割高となり，信頼度の点を考慮すると１台の使用水量の規模は10m^3/s程度が適当と思われる。

* 電力事業部



第1図　ゲート形バルブ水車・発電機
Fig. 1. Gate type bulb turbine and generator

III. バルブ水車をゲートに付けるための対策

この程度の容量のバルブ水車・発電機をゲートに直接取り付けるのに必要な対策として，次のような基本的事項を挙げることができる。

1. 固定翼プロペラ水車の採用

固定翼プロペラ水車を採用すれば，運用面では多少の制限は生じるが小形化，軽量化，保守の簡易化ほかゲート取付に対するメリットは極めて大きいものがある。

しかし，固定翼プロペラ水車は部分負荷で不安定であり効率も極めて低いため，同一ユニットの水車・発電機を複数台設置し，任意台数の運転，停止によって放流量の調整をする。すなわち，1台の主機については全負荷運転か停止のいずれかとし，部分負荷運転は行わないことが望ましい。ただし，放流量の大きさと調整の際の必要な調整幅を考慮の上，ユニットの使用水量及び台数を決定する必要がある。

2. 電動操作ガイドベーンの採用

水車はゲート下部に取り付けられ，日常，近接し難い場所にあり，油圧操作に比べ構成の簡単な電動操作を採用すれば，圧油配管の省略，ゲート巻上時の可とう部分単純化，点検保守の簡易化，更に軽量化など多大の効果が期待できる。

3. 乾式メタルの採用

従来の油入りの軸受は冷却管ほか構造が複雑であるため，小形軽量かつ構成の簡単なボールベアリングあるいはローラベアリングを採用することによって，小形化，軽量化と併せて保守の簡易化を図ることができる。

この程度の容量の水車・発電機で発生するスラスト及びラジアル応力に対しては，乾式メタルで十分な信頼度を保つことができる。

4. 発電機はメンテナンスフリー

発電機はブラシレス同期発電機で，空気冷却器の省略，片側支持の簡素な構造を採用，メンテナンスフリーの態勢を確立の上，密封構造をとることが望ましい。

5. 誘導発電機の採用

誘導発電機を採用することは小形化，軽量化，簡素化などそのメリットは大きいが，並列する系統に高い安定度が要求されるため，一般的には採用が難しい。しかし条件が許せばそのメリットは大きいので，十分検討の価値がある。

6. 制御方式の簡素化

1節で記載の部分負荷運転の省略による簡素化のメリットは大きいが，更に負荷運転中事故波及などにより負荷遮断が発生したとき，直ちにガイドベーンを全閉し，発電機を一度停止させ，事故復旧は停止完了後改めて再始動，並列を行うこととすると，従来形調速機の省略が可能となり，制御系を大幅に簡易化することができる。

なお，ガイドベーン電動操作の操作速度の採り方によっては若干速度上昇率が増加するが，小形機の場合ほとんど問題を生じることはない。

何らかの形で系統に並列するためには，適当な機能を備えた自動電圧調整装置を必ず設置する必要がある。

そのほか保守点検の簡易化のためには，運用上許される限度一杯まで，制御機構の単純化を図ることが有効であって，これが結果的に信頼度の向上に結びつくと考える。

第1図に記入されている水車・発電機の寸法は上記の事項を考慮の上，使用水量10 m³/s，有効落差15～10 mとしたときの概略寸法を示している。

IV. 経済効果の検討

水力発電設備の経済効果は発電所の立地条件，河川の流況及び電気料金ほかその時点における経済環境等，もろもろの要素に関連があり，個々の地点について十分な条件整理が行われた上で検討に入るのが普通であって，一般論による結論はともすると抽象的な概念論に終始し，あまり意味のない場合が多い。しかし「溢水流量の利用」については，少なくとも立地条件はほぼ共通であり，極めて特殊な場合を除けば二，三のほぼ妥当と思われる仮

定を設定することによって，比較的具体性のある結果を得ることが可能である。

1. 所要経費の計算

1） 水車・発電機ほか電機関係設備の費用

水車1台分の全負荷流量を10 m^3/s とすると，落差が多少変化しても単価はほとんど変わらない。電気関係設備の費用も容量にほぼ比例すると仮定する。最大使用水量 $Q\,m^3/s$ に対し，必要台数を並列して設置する。

据付を含め電気関係設備（水車・発電機，変圧器，配電盤・開閉装置，諸装置ほか）の1台分の単価を $(W.T)$ とすると，

$$\text{電気関係設備の費用}=(W.T)\times\frac{Q}{10} \quad \cdots\cdots(1)$$

となる。

2） 仮ゲートの購入費

ゲートに水車・発電機を取り付ける工事を実施するためには，ゲートの上流部に止水壁を設け，ゲート部を締め切る必要がある。ただし，渇水期等湛水位がダムクレストより下がる場合には必要ないが，下流部のダムではダム最低水位はクレストより高いのが普通である。

中下流部では洪水量は相当に大きく，ゲート幅10 m程度は考慮の要があり，台数は5台程度を想定するとフローティングゲートを順次使用するのが通常で，ここでは締切り用フローティングゲート1門を新規に購入すると想定する。

当該フローティングゲートの単価を（$F.G$）とすると，

$$\text{仮ゲートの購入費}=(F.G) \quad \cdots\cdots(2)$$

となる。

3） ゲートの改造費

水車・発電機をゲートに取り付けるために既設ゲートの加工，補強及び巻上機構の補強改造が必要である。ローラゲート等の場合は比較的簡単であるが，ゲートの種類によっては全面改造となる場合もあり，一概には定まらない。しかし，少なくとも台数に比例するからその単価を（G）とすると，

$$\text{ゲートの改造費}=(G)\times\frac{Q}{10} \quad \cdots\cdots(3)$$

となる。

4） 土木関係工事の費用

水車放水管に接続する部分の掘削費，仮ゲートの取付撤去費，必要によっては下流側の仮締切の費用ほか土木関係工事の費用を1台当たり（C）とすると，

$$\text{土木関係工事の費用}=(C)\times\frac{Q}{10} \quad \cdots\cdots(4)$$

となる。

5） 運搬費，仮設備費

水車・発電機ほか機器資材の設置場所への小運搬の費用，運搬，通行あるいは動力ほかの仮設備費を一式（S）とすると，

$$\text{運搬費，仮設備費}=(S) \quad \cdots\cdots(5)$$

となる。

6） 直接工事費

直接工事費は前記式(1)～(5)の合計であるから，

$$\begin{aligned}\text{直接工事費}&=(W.T)\times\frac{Q}{10}+(F.G)+(G)\times\frac{Q}{10}\\&\quad+(C)\times\frac{Q}{10}+(S)\\&=\{(W.T)+(G)+(C)\}\times\frac{Q}{10}+(F.G)+(S)\end{aligned} \quad \cdots\cdots(6)$$

となる。

7） 初期投資額

工事のための諸経費及び関連費の率を15％（通常12～20％）とすると，

$$\begin{aligned}\text{初期投資額}&=1.15\times\text{直接工事費}\\&=1.15\left[\{(W.T)+(G)+(C)\}\times\frac{Q}{10}+(F.G)\right.\\&\quad\left.+(S)\right]\end{aligned} \quad \cdots\cdots(7)$$

となる。

8） 所要年経費

固定資産税，水利使用料などについては算定基準の取り方により異なるが，原価償却費，保守人件費，補修費，適正利潤を含めて10.8％（通常10～15％）とすると，

$$\begin{aligned}\text{所要年経費}&=0.108\times\text{初期投資額}\\&=0.1242\times\text{直接工事費}\\&=0.1242\left[\{(W.T)+(G)+(C)\}\times\frac{Q}{10}+(F.G)\right.\\&\quad\left.+(S)\right]\end{aligned} \quad \cdots\cdots(8)$$

であって式(8)が毎年の所要経費を示す。

2. 年間総収入の想定

1） 全負荷相当日数：N(d)

過去のゲート放流の実績から1年間の有効に発電に使用できる水量の総量 V($m^3/s\cdot d$) を想定し，この量が全負荷使用水量 $Q\,m^3/s$ の N 日分に相当すると想定する。

$$\text{全負荷相当日数}\ N=\frac{V}{Q}(\text{d}) \quad \cdots\cdots(9)$$

2） 有効落差：H(m)

洪水放流のため，ゲートが開かれている間は発電は停止する。洪水量の多い間は保安のためにダム水位は低く運用することが多いが，ゲートが閉じるとダム水位はほぼ満水位で運用すると想定すると，有効落差はダム満水位とゲート下端床の差 H(m)であるから，

$$\text{有効落差}=H(\text{m}) \quad \cdots\cdots(10)$$

となる。

3） 年間発生電力量：W(kWh)

水車・発電機の効率を η とすると，全負荷発生電力は，

$$\text{全負荷発生電力}=9.8\,HQ\eta(\text{kW})$$

であるから，年間 N 日の発生電力量は，

$$\text{年間発生電力量}=9.8\,HQ\eta\times24N$$

$$=235.2HQ\eta N\,(\mathrm{kWh}) \quad \cdots\cdots(11)$$

となる。

4）年間総収入

電力量の単価の想定額を A 円/kWh とすると，

年間総収入$=235.2HQ\eta NA$（円）$\cdots\cdots(12)$

であって式(12)が年間の総収入を示すことになる。

3．損益分離点

式(12)の年間総収入が式(8)の所要年経費を上回れば，発電設備は経済効果を生じることとなり，両者の等しい点が損益分離点である。

経済性の検討を行うに当たって，どの要素について行うかによって種々の方法が考えられるが，ここでは全負荷相当日数 N について検討を進めることとする。

損益分離点に相当する全負荷相当日数を Nc とし，Nc を分離点全負荷日数と称することとする。

式(8)，式(12)にそれぞれ Nc を代入すると，定義から両式は等しくなるので，

$$0.1242\left[\{(W.T)+(G)+(C)\}\frac{Q}{10}+(F.G)+(S)\right]$$
$$=235.2HQ\eta NcA$$

であるから，

$$Nc=5.28\times10^{-4}\frac{\{(W.T)+(G)+(C)\}\frac{Q}{10}+(F.G)+(S)}{HQ\eta A} \quad \cdots\cdots(13)$$

が得られる。

式(13)にそれぞれの値を代入して求めた Nc が，この発電設備の損益分離点を示すこととなる。

すなわち，Nc はその発電設備に年間何日程度のダム放流があれば引き合うのかを示す一つの目安である。

過去の放流実績から想定された全負荷相当日数 N が，式(13)の Nc より多いほど経済効果は大きく，少なければ収支は欠損となることはいうまでもない。

4．H と Q と Nc との関係の一例

式(13)にそれぞれの値を代入し，有効落差 H と全負荷流量 Q とが分離点全負荷日数 Nc との関係を調べることとする。しかし実際の費用は，それぞれの条件によって相当幅の差異があると思われるが，一つの例として，

(1) 水車・発電機のユニットは10 m³/s とし，Ⅱ章の事項を考慮した同期発電機とする。

(2) ゲートはローラゲートで，特に大幅な改造を行うことなく取付可能とする。

(3) 機器資材は堤体上部通路から大形トランシットクレーンによって搬入可能とする。

(4) ゲートの幅は10 m，重量は150 t 程度で，巻上機構には多少の補強改造を必要とする。

上記の条件で想定した場合，各項の費用は次のとおりである。

$(W.T)$ $=2.1\times10^8$円/台

$(F.G)$ $=1.8\times10^8$円/台

(G) $=1.0\times10^8$円/台

(C) $=1.6\times10^8$円/台

(S) $=2\times10^7$円/台

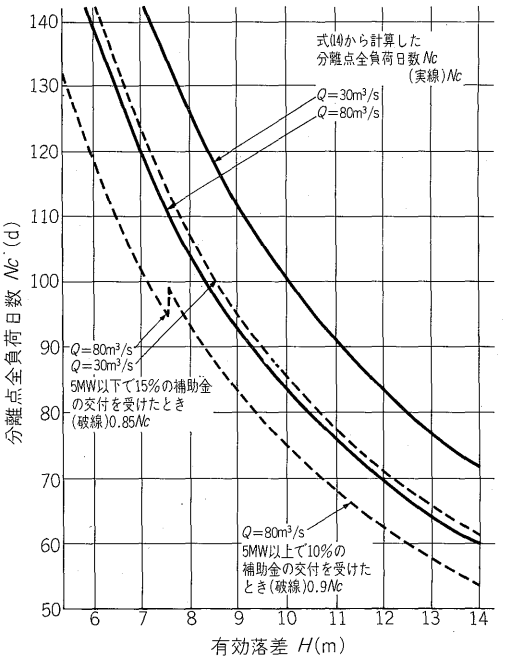
η $=0.8$

A $=20$円/kWh

と仮定して Nc を計算すると，

$$Nc=811.8\times\frac{1+\frac{8.13}{Q}}{H} \quad \cdots\cdots(14)$$

が得られる。式(14)に H と Q を代入してそれぞれの値を計算すると，第2表の結果が得られる。第2図の実線が第2表の結果(一部)をグラフに示したものである。各要素の値が変化してもグラフの傾向は同一と考えて差し支えない。



第2図　$H-Q$ に対する Nc の変化

Fig. 2. Relation between Nc and $H-Q$

第2表　$H-Q$ に対する Nc の変化

Table 2. Relation between Nc and $H-Q$

ただし，H ：満水位とゲート下端の間の水頭(m)

Q ：全負荷使用水量(m³/s)

Nc：分離点全負荷日数(d)

Q (m³/s)	分離点全負荷日数 Nc				
	$H=6$ m	$H=8$ m	$H=10$m	$H=12$m	$H=14$m
30	17.0	129.0	103.2	86.0	73.7
40	16.8	122.1	97.7	81.4	69.8
50	15.3	118.0	94.4	78.6	67.4
60	15.6	115.2	92.2	76.8	65.8
70	15.0	113.3	90.6	75.5	64.7
80	14.0	111.8	89.4	74.5	63.9
90	14.5	110.6	88.5	73.8	63.2
100	14.3	109.7	87.8	73.1	62.7

太い線の左上は出力5 MW 以下

V. あとがき

想定された全負荷相当日数 N が第2図の曲線の上部にあれば採算が採れる――すなわち発電原価は20円/kWhを下回る――ことを意味している。

しかし，たとえ過去の放流実績に関して相当詳しい資料が得られたとしても，全負荷相当日数 N を正確に想定することは極めて繁雑であり難しい。しかし，大略の見当をつけるためであれば，過去の年間ゲート放流の日数から，ゲート開度の特に大きい日数（出水量が大きく発電不能と考えられる日数）を差し引いた日数がほぼ全負荷相当日数に相当すると考え，採算の概略見通しなどは可能と思われる。

当然ではあるが，ゲートの高さの高いほど分離点全負荷日数 Nc は低くなって採算がとりやすくなるが，ゲート高さが6m以下の場合では経済効果を期待することは難しい。

であるが，農業用水専用のダム等において年間相当の長期間ゲート放流を行う場合は，その期間，流量によって，たとえゲート高さが低くともそれなりに経済効果を期待し得る場合もあり得る。

また水車の運転，停止によって容易かつ正確に放水量を調節できるので，極めて繁雑な業務である出水末期のゲートの微調整操作をほとんど省略することができる。

したがって高堰堤において，微調整用の放流管としてバルブ水車・発電機をゲートに取り付けることも一つの方法であって，この場合回収できるエネルギーは総落差の一部に過ぎないが，未利用資料源の開発であり，調整操作はゲートより容易かつ正確で，放流のための損傷等もほとんど生じることなく，放流のエネルギーを多少とも抑える効果も発生する。

未利用資源の開発は目下の急務であり，我が国では，小水力の開発を促進するために特に補助金を援助している。

規程によると，補助金の規模は5MW以下は建設費の15%，5～20MWでは10%，20～50MWについては5%である。溢水利用については必ずいずれかに該当すると思われる。該当すれば第2図の破線に示すように，分離点全負荷日数 Nc が85%ないし90%に下がることとなって経済性が一段と向上する。

実施に当たって河川使用料，漁業権ほか河川の使用に関する事項，洪水直後にダム水位が満水近くまで上昇するための保安上の配慮，他河川に直接関連する諸問題を解決する必要はあるが，用地に関する難しい問題の発生する可能性は極めて少ないと思われる。

以上，未利用資源である溢水流量の利用について検討した結果の取りまとめを行った。前にも述べたとおり，水力地点の経済性に関してはその地点地点の特異性が結果を左右する場合が多い。本稿では極力検討の具体化に努力したつもりではあるが，やはり概念論の域を脱し切れない点も多々あると思われる。しかし今後の各地点における具体的検討に当たって，多少とも資するところがあれば誠に幸いと考える次第である。

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。