

# ダム放流音に関する現地観測

## — 天ヶ瀬ダム (アーチ式ダム) の放流音特性 —

小野雅人\* 柏井条介\*\*

### 1. はじめに

ダムからの放流水は減勢工あるいは下流河道において減勢される。減勢の際、跳水等で生じる大きな乱れによって、水の持つエネルギーの一部が熱や音に変換されている。その発生音は、騒音としての問題があり、特に低周波音が大きい場合には、周辺の建物内の建具や窓ガラスなどを振動させることがある。

ダム放流音の周波数特性については、これまでの現地観測結果から、周波数が2倍となるごとにエネルギーが1/2となるようなピンクノイズの傾向を示すことが明らかとなっている<sup>1)</sup>。ダム放流音については、これまでも種々の検討がなされているが、対象とする施設や流量条件が限定されており、ダム放流音の予測手法及び低減対策を確立するためには、さらに水理模型実験による検討、ならびに現地観測データの蓄積が必要である。

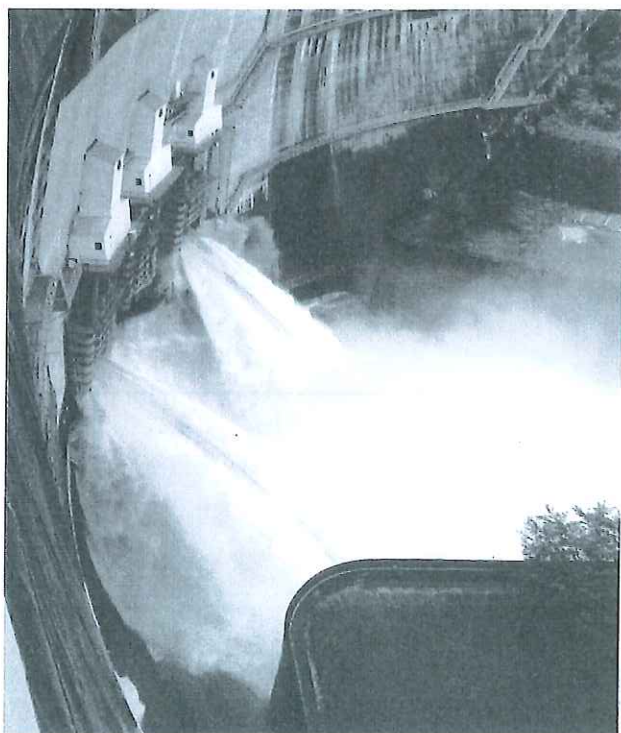


写真-1 天ヶ瀬ダム放流状況

Field Survey for Sound Characteristics in Amagase Dam

土木研究所ダム水理チームでは、水理模型実験によるダム放流音の予測方法や低減対策の検討を進める一方で、低周波音の発生状況の把握や水理模型実験の検証データ収集等の観点から、これまでに幾つかのダムで放流音の測定を行ってきた。

本報告は、比較的広範囲にわたり放流音の観測を行うことができた空中放流式の天ヶ瀬ダム常用放流設備 (以下、コンジットという) について放流音特性の推定を行うとともに、これまで検討が進められてきた水平水叩き式減勢工の放流音特性との比較を行ったものである。

なお、水理模型実験による発生音の予測手法、低減対策についても検討を進めており、これについては別の機会に報告したい。

### 2. 現地観測の概要

天ヶ瀬ダムは、昭和39年に淀川水系宇治川に建設されたアーチ式コンクリートダムである。放流水の減勢方法は、放流水をダム直下の減勢池内で水中拡散させ、水中での乱れによってエネルギーの減殺を行う一般のアーチ式ダムに見られるタイプである (写真-1 参照)。

現地観測は、平成13年8月28日及び9月13日の2日間実施した。両日とも、出水後における琵琶湖の水位調節のための放流である。

放流音の観測地点を図-1に示す。観測は主として、ダム堤体上や減勢工付近及びダム下流河川を主体とした地域で実施した。特に、ダムから見通しがきく下流河川沿いの地点については、距離減衰式の適用を考慮して、各観測点の間隔が概ね等間隔になるよう配置した。

また、放流音の計測には1~1,000Hzの間で歪みのない測定が可能な低周波音レベル計を用いた。

### 3. 放流音特性の推定

#### 3.1 音の伝搬に関する基本式

音源が小さく、その音響出力がどの方向にも一

様な音響エネルギーを放射して球面状に伝搬していく場合、音源は点音源とみなせる。これまでの水平水叩き式減勢工における放流音の検討から、跳水音の発生音は跳水始端部からの発生音が支配的であることが明らかになっており<sup>2)</sup>、例えば、放流管からの流れのように、幅が制約されたまとまった水脈が広い減勢池内に突入する場合の音源は、跳水始端部を音源位置とする点音源と考えることができる。

ここで、天ヶ瀬ダムのコンジットについて見てみると、コンジットからの放流水脈は拡散しながら落下するものの、その主流はまとまった水脈として減勢池に突入していることから、音源は水平水叩き式減勢工の場合と同様に、放流水脈の減勢池への突入地点を音源位置とする点音源と考えることができる。

また、天ヶ瀬ダムは3門のコンジットを有す

るが、複数のコンジットから放流した場合には、各コンジットからの放流水脈の主流は互いに干渉し合うことなくそれぞれ単独の水脈として減勢池に突入していることから、各放流水脈の突入地点が点音源となり、観測値はこれらが合成したものとして与えられる。

音源を点音源、空間を半自由空間とし、各コンジットから放流した場合の音響パワーレベル(音源から単位時間に放出される音の全エネルギーである音響出力を対数尺度で表示したもの)を  $PWL_j$  (dB) とすれば、合成音響パワーレベル  $PWL$  (dB) と地点 ( $i$ ) での音圧レベル  $SPL_i$  (dB) の関係は次式で与えられる。

$$SPL_i = PWL - 20 \log r_i - 8 - \alpha_d - \alpha_e \quad (1)$$

$$PWL = 10 \log \left( \sum_j 10^{\frac{PWL_j}{10}} \right) \quad (2)$$

ここに、 $r_i$ : 音源 ( $j$ ) から観測点 ( $i$ ) までの距離 (m),  $\alpha_d$ : 回折減衰値 (dB),  $\alpha_e$ : 超過減衰値 (dB) である。

なお、超過減衰には、主として空気吸収による減衰と地表面の吸収による減衰があるが、ダム放流音のような低周波音が卓越している場合には、その減衰量はほとんど無視できるほど小さい。

また、式 (1) はオーバーオール音圧レベル (全体の音圧レベル) について述べているが、当然のことながら、ある特定の周波数バンドについても成立する。

### 3.2 使用データ

音響パワーレベルや音源の周波数特性については、観測データを用いて式 (1) から推定することができる。しかし、式 (1) の適用に当たっては、回折減衰量の推定が難しいこと、音源を点音源と仮定しているため、音源近傍では適用できないと考えられることから、放流音特性の推定には、回折減衰の影響を無視できると考えられる放流地点から直接見通しのきく地点で、かつ、音源近傍を除く地点として、A, D, Q, R, T, U 地点のデータを用いることとした。放流音特性の推定に用いたデータを表-1 に示す。

また、放流音特性の推定に関する基本

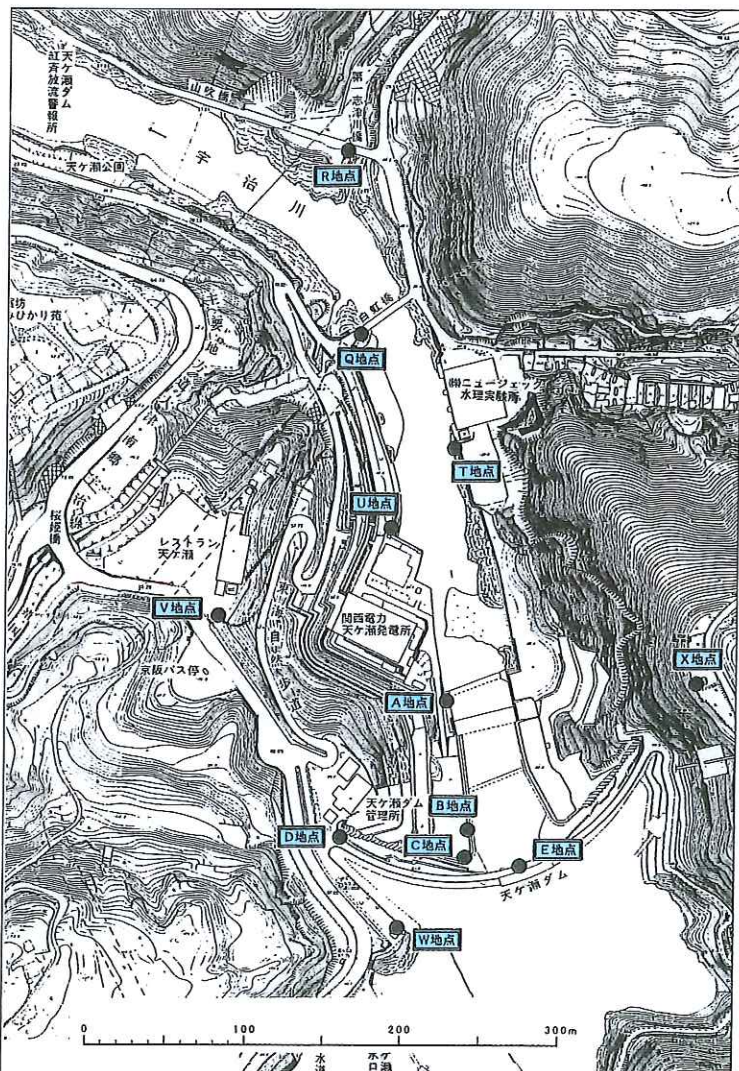


図-1 現地観測地点

式は、式 (1) において  $\alpha_d = \alpha_e = 0$  とした次式となる。

$$SPL_i = PWL - 20 \log r_i - 8 \quad (3)$$

### 3.3 音響パワーレベル

放流パターン①, ②, ③の3放流パターンについて、それぞれ現地観測データから式 (3) を用いて音響パワーレベルの推定を行った。

音源位置である放流水脈の減勢池への突入地点は、ゲート出口で貯水位との水位差による初速を与えた自由落下式により計算を行った。

なお、落下に伴うエネルギー損失、ゲート半開時における下向きの偏向は無視している。また、複数のコンジットから放流している場合は、各音源の重心を音源位置とした。

#### 3.2.1 パターン①における音響パワーレベル

このパターンではゲート3門から放流が行われている。各ゲートからの放流量は各々若干異なるが、簡単のため1門当たりの放流量は全放流量  $103\text{m}^3/\text{s}$  を3等分した  $34.3\text{m}^3/\text{s}$  とする。このパターンでのデータはA地点のみであり、A地点での観測値を用いて式 (3) より音響パワーレベルを求めると  $143.1\text{dB}$  となる。この値は  $34.3\text{m}^3/\text{s}$  を3門放流している場合の合成音響パワーレベルと考えられ、これを1門当たりに換算すると  $138.3\text{dB}$  となる。すなわち、1門当たりの放流量  $34.3\text{m}^3/\text{s}$  の場合の音響パワーレベルは  $138.3\text{dB}$  と考えられる。

#### 3.2.2 パターン②における音響パワーレベル

このパターンではゲート1門のみの放流 ( $17\text{m}^3/\text{s}$ ) の放流である。このパターンでのデータはD地点のみであり、D地点での観測値を用いて式 (3) より

音響パワーレベルを求めると  $134.4\text{dB}$  となる。

#### 3.2.3 パターン③における音響パワーレベル

このパターンではゲート2門から放流が行われている。パターン①と同様、各ゲートからの放流量は若干異なるが、簡単のため1門当たりの放流量は全放流量  $106\text{m}^3/\text{s}$  を2等分した  $53\text{m}^3/\text{s}$  とする。このパターンでの観測データは複数 (A, D, Q, R, T, U 地点) あるため、各地点での観測値と距離との回帰式より音響パワーレベルを求めたこととした。回帰式の傾きは式 (3) の距離減衰式の傾きとほぼ等しく、回帰式より音響パワーレベルは  $147.6\text{dB}$  となる。この値は  $53\text{m}^3/\text{s}$  を2門放流している場合の合成音響パワーレベルと考えられ、これを1門当たりに換算すると  $144.6\text{dB}$  となる。すなわち、1門当たりの放流量  $53\text{m}^3/\text{s}$  の場合の音響パワーレベルは  $144.6\text{dB}$  と考えられる。

コンジット1門当たりの放流量  $Q_j$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) と音響パワーレベル  $PWL_j$  (dB) の関係は図-2に示すとおりであり、回帰式を求めると次式のようになる。複数のコンジットから放流している場合は、各コンジットについて音響パワーレベル  $PWL_j$  (dB) を求め、式 (2) により合成すればよい。

$$PWL_j = 8.6188 \ln(Q_j) + 109.41 \quad (4)$$

これより、音響パワーレベルは  $\ln(Q)$  ( $Q$ : 放流量) に比例することが分かる。これは、水平水叩き式減勢工の場合と同様の傾向である。しかしながら、コンジット1門当たりの放流量が  $53\text{m}^3/\text{s}$  を越える場合の音響パワーレベルは外挿による推定となるため、大流量の場合の音響パワーレベルも  $\ln(Q)$  に比例するかどうか、現地観測による検証が必要である。

また、前述のとおり、音響パワーレベルの推定には、放流地点から直接見通しのきく地点で、かつ、音源近傍を除く地点としてA, D, Q, R, T, U地点のデータを用いた。ここで、A, D, Q, R, T, U地点、ならびに推定に用いていない回折の影響を受けると考えられるV, W, X地点及び音源近傍のB, C, E地点の観測値と推定式との関係を図-3に示す。図より、V, W, X地点では回折の影響を受け、観測値は推定値より小さい値となっている。特に、W地点では、ダム堤体が大きな障壁となっていることが

表-1 放流音特性の推定に用いたデータ

放流条件	コンジット放流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )				地点名	音圧レベル (dB)
	1号	2号	3号	合計		
放流パターン①	37	36	30	103	A地点	93.6
放流パターン②	—	17	—	17	D地点	84.6
放流パターン③	52	—	54	106	A地点	96.1
					D地点	97.4
					Q地点	87.7
					R地点	85.0
					T地点	91.3
					U地点	91.8

分かる。音源近傍では、音源より下流側のB地点で観測値は推定値よりやや大きめの値となっているが、音源より上流側のC地点及び天端中央のE地点では逆に観測値は推定値より小さくなっている。これは、ダム堤体や減勢工の複雑な形状の影響によるものと考えられる。

### 3.4 音のエネルギーへの変換率

これまでのダム放流音に関する検討から、音響出力は流入エネルギーに概ね比例することが明らか

かとなっており<sup>2)</sup>、ここでは音響出力と流入エネルギーの比(音のエネルギーへの変換率)について整理を行ってみる。

音響出力  $W(w)$  と音響パワーレベル  $PWL$  の間には次の関係がある。

$$PWL = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (5)$$

ここに、 $W_0$ : 音響出力の基準値 ( $10^{-12}w$ ) であり、 $PWL$  は式 (2), (4) で与えられる。

また、流入エネルギー  $E(w)$  は次式で与えられる。

$$E = \frac{\rho_w Q v^2}{2} \quad (6)$$

ここに、 $\rho_w$ : 水の密度 ( $kg/m^3$ ),  $Q$ : 放流量 ( $m^3/s$ ),  $v$ : 流入流速 ( $m/s$ ) である。

音源位置は、前述のとおり、放流水脈の減勢池への突入地点とし、流下に伴うエネルギー損失は無視している。

変換率を  $\alpha = W/E$  とし、現地観測結果について、フルード数  $F_r$  と変換率  $\alpha$  の関係を図-4 に示す。図には、比較のため、水平水叩き式減勢工を有する三春ダム(重力式ダム)での観測結果も併せて示している。

図より、天ヶ瀬ダム(アーチ式ダム)の変換率は、水平水叩き式ダムの場合と同様に、フルード数の増加に伴い減少する右下がりの傾向を示している。また、天ヶ瀬ダムの変換率は水平水叩き式ダムの場合と比べて大きくなっている。この要因としては、減勢による音のエネルギーへの変換の他に、空中放流により誘発された空気振動の影響が加わっている可能性が考えられる。

音響パワーレベルは、流入エ

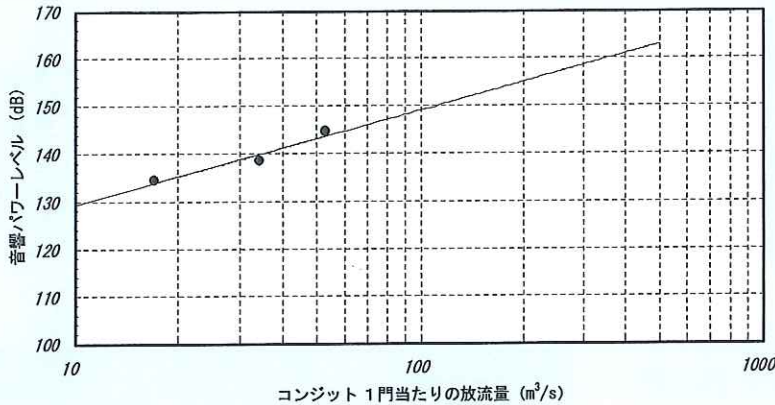


図-2 徳コンジット 1 門当たりの放流量と音響パワーレベルの関係

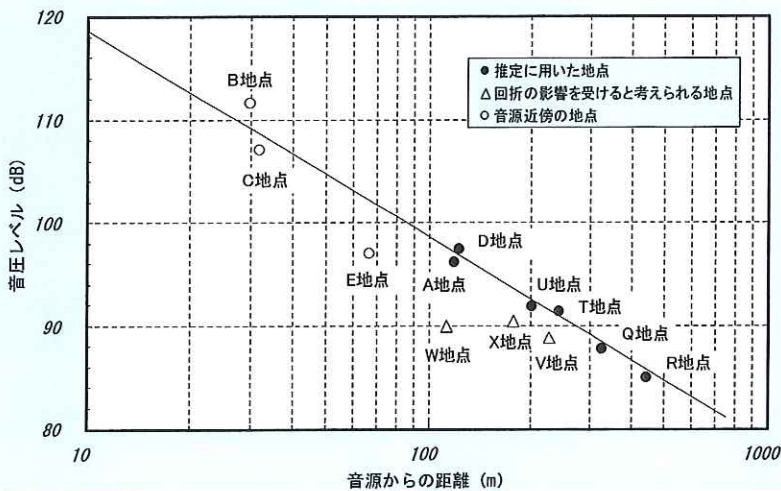


図-3 観測値と推定値の比較

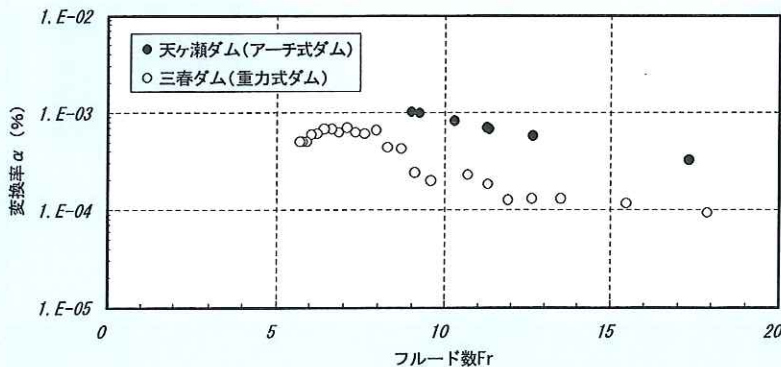


図-4 フルード数と変換率の関係

エネルギーに変換率を乗じることで求められる。この場合の変換率は、やや大きめ(天ヶ瀬ダムの場合  $1.5 \sim 2 \times 10^{-3}$  %程度)に見積もっておけば安全である。

### 3.5 音源の周波数特性

前述したとおり、ダム放流音は低周波帯のエネルギーが大きいことから、低周波帯について別途 1/3 オクターブ分析を行い、その結果を用いて周波数特性の検討を行った。

1/3 オクターブ分析結果を図-5 に示す。使用したデータは表-1 に示す地点のデータであり、縦軸は各バンドの音圧レベルをオーバーオール値で無次元化したパワースペクトル比で表している。

これまでの水平水叩き式減勢工の検討では、音源のパワースペクトル比は、一定の減勢工形状に対して、概ね流況に依らない固有の特性をもつことが示されている<sup>2)</sup>。

天ヶ瀬ダムの場合、各地点のパワースペクトル比は、放流パターン②の D 地点を除き、概ね同じ分布になっている。放流パターン②の D 地点のみ分布形状が異なる理由は定かではないが、放流パターン②の放流量は小さく、一定の流入エネルギー以下では、スペクトル分布に明確なピークが現れにくいことが要因の一つとして考えられる。また、観測時に他の自然騒音等の影響を受けた可能性もある。

天ヶ瀬ダムの場合も、音源のパワースペクトル比は、水平水叩き式ダムの場合と同様に、各観測地点の平均的な形状として捉えることができると考えられることから、音源のパワースペクトル比は各観測地点から求められる音源位置のパワースペクトル比の平均値とした。

表-2 に平均値の数値データを示す。最も卓越している 1/3 オクターブバンドの中心周波数は 1.25Hz であり、このバンド帯 (1.12 ~ 1.4Hz) のエネルギーは全エネルギーの約 1/4 を占めている。また、1~16Hz (バンド帯

では 0.9 ~ 18Hz) までの周波数で全エネルギーの約 9 割を占めており、これからも天ヶ瀬ダムの放流音は低周波音の卓越した音であることが分かる。

### 4. 放流音特性の検証

推定した放流音特性の妥当性の検証を行うため、放流パターン③における現地観測時の再現計算を行い、V, W, X の 3 地点について現地観測結果との比較を行った。計算には 10m メッシュの数値地図を用いて地形による回折減衰の効果も考慮した。

現地観測結果と予測計算結果の比較を図-6 に示す。図より、各地点とも 1~4Hz 程度までは両者の結果はよい一致を示している。3~4Hz 以上の周波数では、W 地点を除き、現地観測結果の方が音圧レベルがやや大きくなっている。これは、放

表-2 音源のパワースペクトル比 (平均値)

中心周波数 $f_0$ (Hz)	遮断周波数 $f_1 \sim f_2$ (Hz)	パワー スペクトル比
1	0.9 ~ 1.12	0.0267
1.25	1.12 ~ 1.4	0.2306
1.6	1.4 ~ 1.8	0.1391
2	1.8 ~ 2.24	0.0453
2.5	2.24 ~ 2.8	0.0819
3.15	2.8 ~ 3.55	0.0594
4	3.55 ~ 4.5	0.0400
5	4.5 ~ 5.6	0.0469
6.3	5.6 ~ 7.1	0.0388
8	7.1 ~ 9	0.0390
10	9 ~ 11.2	0.0339
12.5	11.2 ~ 14	0.0444
16	14 ~ 18	0.0474

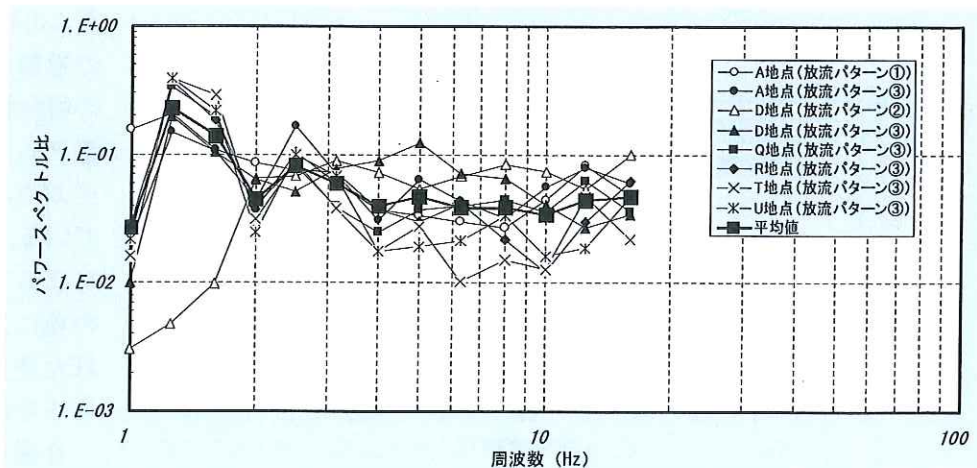


図-5 1/3 オクターブ分析結果

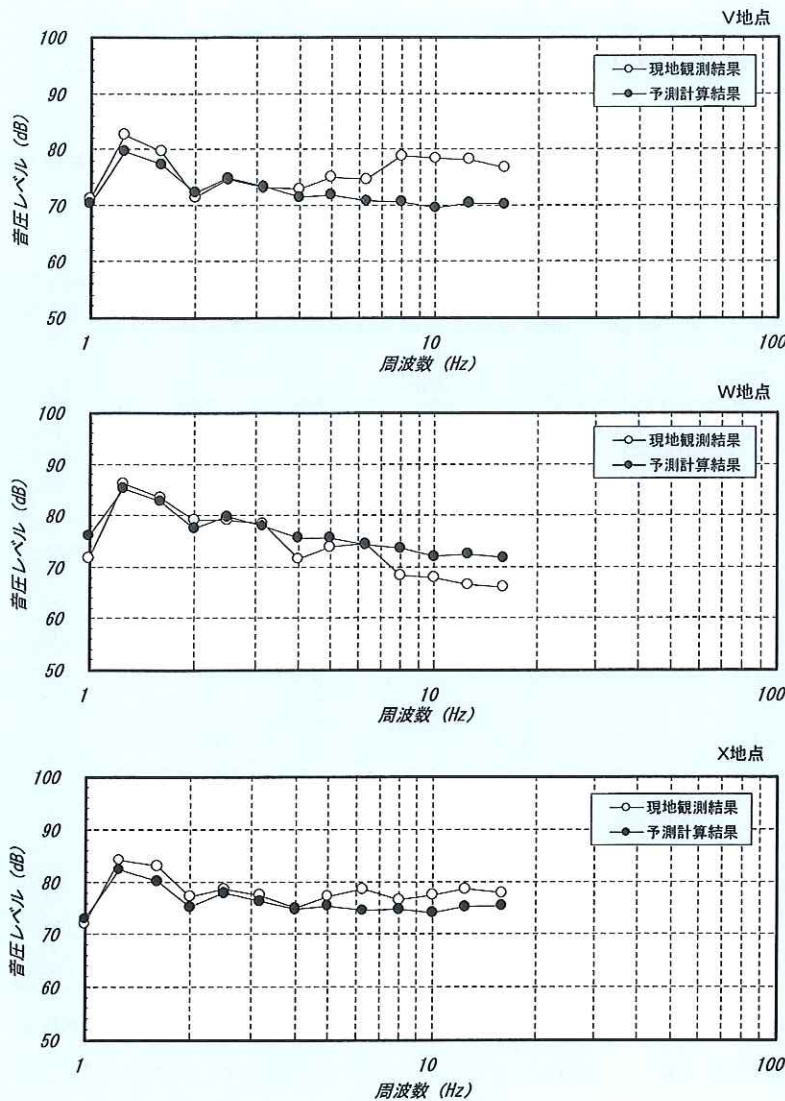


図-6 現地観測結果と予測計算結果の比較 (1/3 オクターブ分析)

流音以外の自然騒音、生活雑音等による影響が考えられる。また、W 地点では逆に現地観測結果の方がやや小さくなっているが、これは回折の影響が現れているものと考えられる。すなわち、10mメッシュの数値地図ではアーチダムの複雑な曲線形状を適切に再現しきれていないことが考えられるが、両者の差は数 dB 程度と小さい。

以上のことから、本検討で用いた推定方法は概ね妥当なものであると考えられる。

### 5. おわりに

本報告では、アーチ式ダムである天ヶ瀬ダムの放流音特性について、現地観測結果をもとに推定を行った。主な結論は以下のとおりである。

- (1) 天ヶ瀬ダム (アーチ式ダム) における流入エネルギーの音のエネルギーへの変換率は、水平水叩き式減勢工の場合よりも大きい。
- (2) 音源のパワースペクトル比は、概ね流況に依らない固有の分布形状をもつ。

なお、今回の現地観測は、近畿地方整備局琵琶湖工事事務所、ならびに淀川ダム統合管理事務所天ヶ瀬ダム管理支所の協力を得て行った。ここに、記して深く謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 小野雅人、桜井力:減勢工の発生音特性に関する現地観測, ダム工学会第 11 回研究発表会講演集, 2000 年 11 月
- 2) 桜井力、柏井条介、櫻井寿之:天ヶ瀬ダム水理模型実験報告書(その 2) - トンネル式放流設備の発生音特性 -, 土木研究所資料第 3718 号, 2000 年 3 月

小野雅人\*



独立行政法人土木研究所  
水工研究グループダム水  
理チーム主任研究員  
Masato ONO

柏井条介\*\*



同 水工研究グループダ  
ム水理チーム上席研究員  
Josuke KASHIWAI