

第4章 地下に設けた減勢工の発生音特性とその予測手法

ダム放流時に発生する超低周波音の低減対策のひとつとして、減勢工を地下に設けることにより、発生音のエネルギーを外部に発散させずに地下空洞内で減衰させ、外部に拡散する音響エネルギーを最小限に抑える手法が考えられる。

本章では、第3章で検討した跳水式減勢工を地下構造とした場合を対象として、規模の異なる模型を用いた水理模型実験を行い、水理学的条件、幾何学的条件とトンネル出口における観測音の音圧、周波数特性の関係を把握し、跳水始端部において発生した音がトンネル内を伝播する際の変化について考察する。また、これらの結果をもとに、模型実験から実機において観測される値を予測する手法についての検討を行う^{1),2)}。

4.1 模型実験

実験は、第3章と同様、相似則や縮尺効果の検討を目的として幾何学的に相似で大きさの異なる4種類の模型を用いて行った。実験に用いた模型のうち2番目に小さい模型の概要を図-4.1に示す。なお、模型は、第3章の実験に用いた模型にトンネル天井を加えた形状であり、減勢工部分のみ再現した抽出模型としている。各模型の大きさは、最も小さい模型(モデル1)を基準として、それぞれ2倍(モデル2)、3倍(モデル3)および4倍(モデル4)となっている。ただし、現象の2次元性を仮定し、厚さ方向の寸法は全模型とも20cmとしている。放流条件は表-4.1に示したとおりであるが、各模型とも9ケースの実験を行い、対応する各縮尺模型の水理条件がフルード相似となるように設定した。実験は天井を設けない場合についても行った。なお、跳水の形態や流れの特性は跳水前の流入フルード数によって異なるが、今回の放流条件でのフルード数は7~15程度であり、安定した「定常跳水」と跳水内部における激しい渦動のために波動が下流に伝播する「強跳水」の2種の形態を含む範囲となっている³⁾。

音の測定位置は、図-4.1に示すように、跳水始端部直上の測点1(ただし、天井を設けない場合のみ)、副ダム下流の測点2および給気管直上部の測点3である。

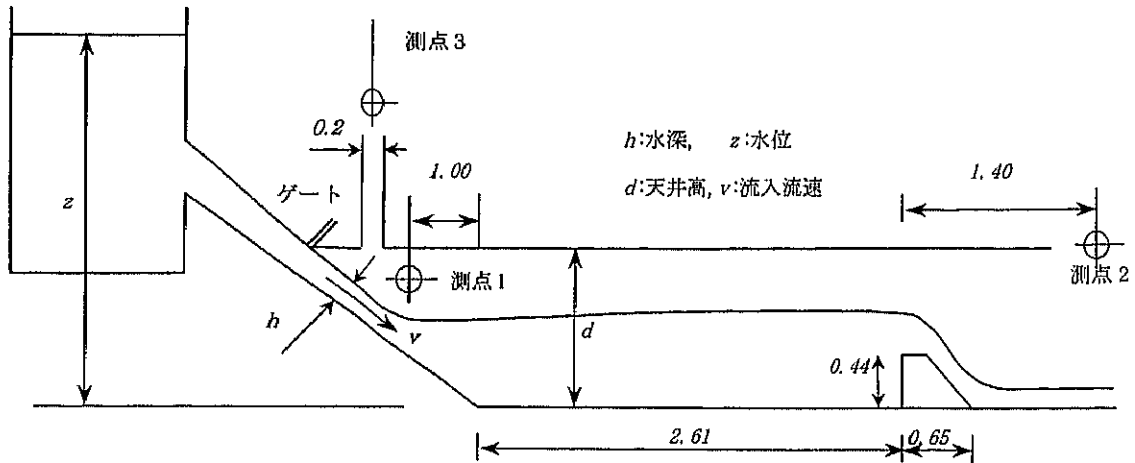
測定には、1~1000Hzの間での平坦特性SPLを持つ低周波音レベル計を用いた。記録した出力はサンプルレート2000HzでAD変換し、音圧実効値を求めるとともに、FFT解析を行い、パワースペクトルを求めた。

また、同一の放流量をバイパス水路で流してポンプ運転音等の暗騒音測定を行い、実験結果から差し引いた。

表-4.1 実験条件一覧

| 模型 縮尺 $1/n$ | 天井 高さ d cm | 流入条件 | | | | | 実験 No. |
|-------------------|-------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------|-----------|
| | | 水位 Z m | 水脈厚 h cm | 流量 Q l/s | 流速 v m/s | Fr 数 | |
| 1 | 43.5 | 1.50 | 1.29 | 9.7 | 3.76 | 10.6 | 1-1-a, b |
| | | 1.25 | 1.15 | 8.1 | 3.52 | 10.5 | 1-2-a, b |
| | | 1.00 | 1.03 | 6.2 | 3.01 | 9.5 | 1-3-a, b |
| | | 1.50 | 1.57 | 13.3 | 4.24 | 10.8 | 1-4-a, b |
| | | 1.25 | 1.48 | 11.0 | 3.72 | 9.8 | 1-5-a, b |
| | | 1.00 | 1.30 | 8.3 | 3.19 | 8.9 | 1-6-a, b |
| | | 1.50 | 2.33 | 20.1 | 4.31 | 9.0 | 1-7-a, b |
| | | 1.25 | 2.14 | 15.7 | 3.67 | 8.0 | 1-8-a, b |
| | | 1.00 | 1.87 | 11.9 | 3.18 | 7.4 | 1-9-a, b |
| 2 | 87.0 | 3.00 | 2.44 | 28.0 | 5.74 | 11.7 | 2-1-a, b |
| | | 2.50 | 2.31 | 23.5 | 5.09 | 10.7 | 2-2-a, b |
| | | 2.00 | 2.00 | 18.2 | 4.55 | 10.3 | 2-3-a, b |
| | | 3.00 | 3.44 | 37.8 | 5.49 | 9.5 | 2-4-a, b |
| | | 2.50 | 3.03 | 31.4 | 5.18 | 9.5 | 2-5-a, b |
| | | 2.00 | 2.53 | 23.8 | 4.70 | 9.4 | 2-6-a, b |
| | | 3.00 | 4.76 | 54.6 | 5.74 | 8.4 | 2-7-a, b |
| | | 2.50 | 4.36 | 45.0 | 5.16 | 7.9 | 2-8-a, b |
| | | 2.00 | 3.65 | 33.8 | 4.63 | 7.7 | 2-9-a, b |
| 3 | 130.5 | 4.50 | 3.39 | 51.5 | 7.60 | 13.2 | 3-1-a, b |
| | | 3.75 | 3.22 | 43.3 | 6.72 | 12.0 | 3-2-a, b |
| | | 3.00 | 2.86 | 33.5 | 5.86 | 11.1 | 3-3-a, b |
| | | 4.50 | 4.89 | 69.4 | 7.10 | 10.3 | 3-4-a, b |
| | | 3.75 | 4.36 | 57.6 | 6.61 | 10.1 | 3-5-a, b |
| | | 3.00 | 3.79 | 43.8 | 5.78 | 9.5 | 3-6-a, b |
| | | 4.50 | 6.84 | 100.4 | 7.34 | 9.0 | 3-7-a, b |
| | | 3.75 | 6.30 | 82.6 | 6.56 | 8.3 | 3-8-a, b |
| | | 3.00 | 5.63 | 62.1 | 5.52 | 7.4 | 3-9-a, b |
| 4 | 174.0 | 6.00 | 4.68 | 78.8 | 8.42 | 12.4 | 4-1-a, b |
| | | 5.00 | 4.12 | 66.2 | 8.03 | 12.6 | 4-2-a, b |
| | | 4.00 | 3.68 | 50.6 | 6.88 | 11.4 | 4-3-a, b |
| | | 6.00 | 6.00 | 107.4 | 8.95 | 11.7 | 4-4-a, b |
| | | 5.00 | 5.58 | 89.4 | 8.01 | 10.8 | 4-5-a, b |
| | | 4.00 | 4.85 | 67.2 | 6.93 | 10.0 | 4-6-a, b |
| | | 6.00 | 9.76 | 156 | 7.99 | 8.2 | 4-7-a, b |
| | | 5.00 | 9.09 | 128.4 | 7.06 | 7.5 | 4-8-a, b |
| | | 4.00 | 7.48 | 94.5 | 6.32 | 7.4 | 4-9-a, b |

注) 実験No.において、aは天井のないケース、bは天井のあるケース



注)2倍模型の寸法を示した。(単位:m)

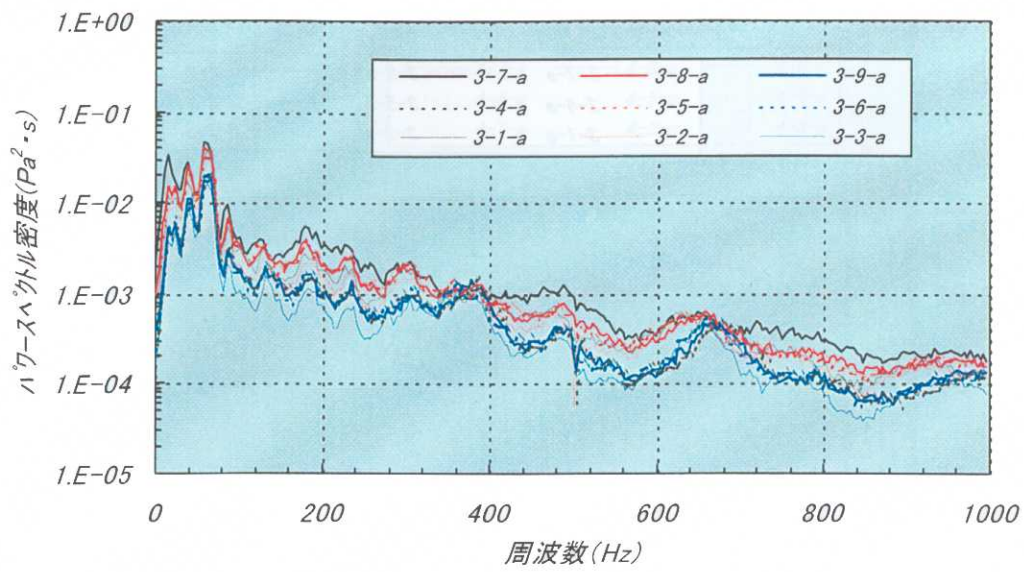
図-4.1 実験模型の概要

4.2 トンネル式減勢工における音の発生機構

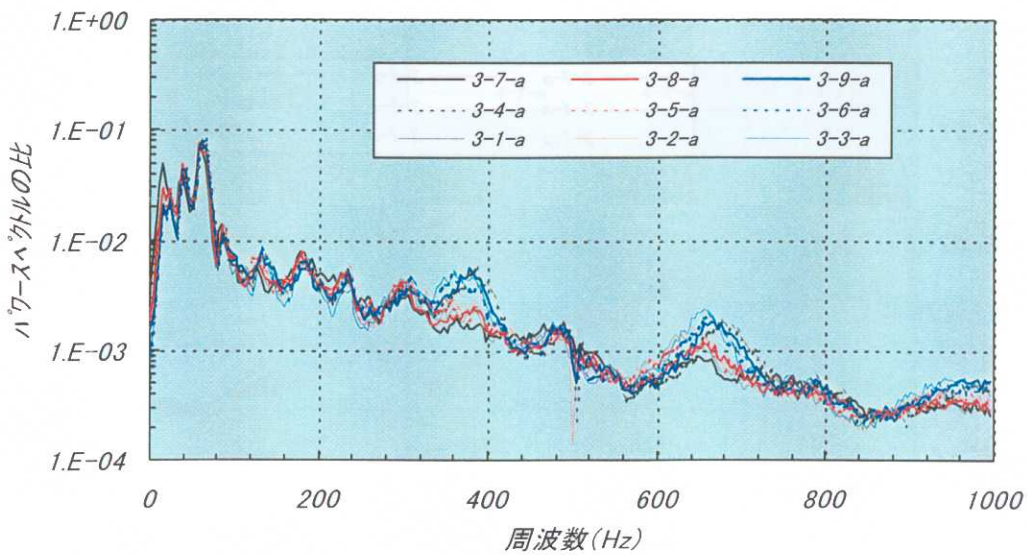
図-4.2~4 に天井を設けない場合の各模型縮尺の測点1における測定音のパワースペクトルを、図-4.5~8 に天井を設けた場合の各模型縮尺の測点2における測定音のパワースペクトルを示した。各図とも、上段はパワースペクトル密度（周波数当たりの音圧実効値）を、下段はオーバーオール値で除して正規化したパワースペクトルを示した。

前章でも述べたように、天井を設けない場合、すなわち跳水始端部における発生音は、各縮尺模型とも無次元されたパワースペクトルはほぼ一致しており、縮尺が同一である場合、放流条件に依らない固有の周波数特性を持っている。天井を設けた場合、すなわち、減勢工をトンネル式とした場合にトンネル出口で観察される音のパワースペクトルも各縮尺模型とも正規化されたパワースペクトルはほぼ一致しており、縮尺が同一である場合、放流条件に依らない固有の周波数特性を持つことがわかる。

また、図-4.9 は、同じ放流条件における天井を設けた場合の各縮尺模型の周波数特性(実験 no. 1-7-b, 2-7-b, 3-7-b, 4-7-b)を比較したものである。低周波帯に卓越周波数を持ち、模型縮尺が大きいほどその卓越周波数は低くなっていることがわかる。この傾向は図-2.6 に示した跳水始端部における発生音と同様であるが、個々の周波数成分は異なっており、トンネル出口における測定音の卓越周波数は、跳水始端部での測定音より明確に現れており、また、より低周波数帯に現れている。



図・4.3a 3 倍模型始端部発生音のパワースペクトル分布



図・4.3b 3 倍模型始端部発生音のパワースペクトル分布

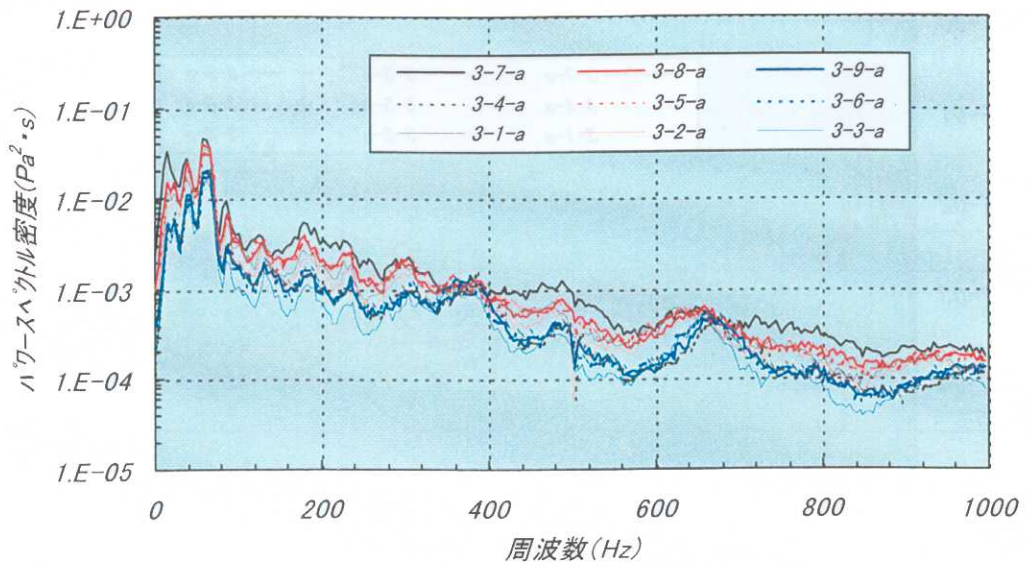


図-4.3a 3倍模型始端部発生音のパワースペクトル分布

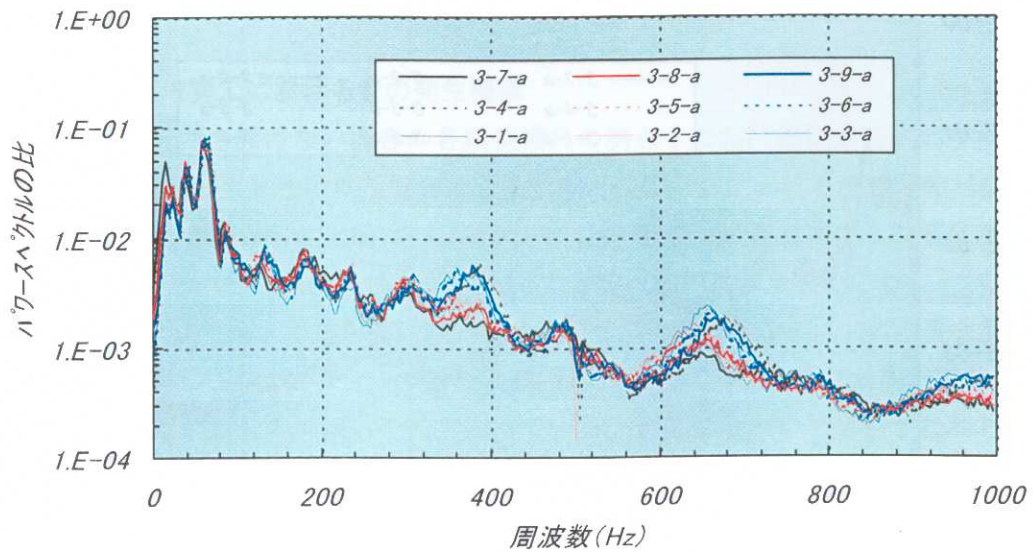


図-4.3b 3倍模型始端部発生音のパワースペクトル分布

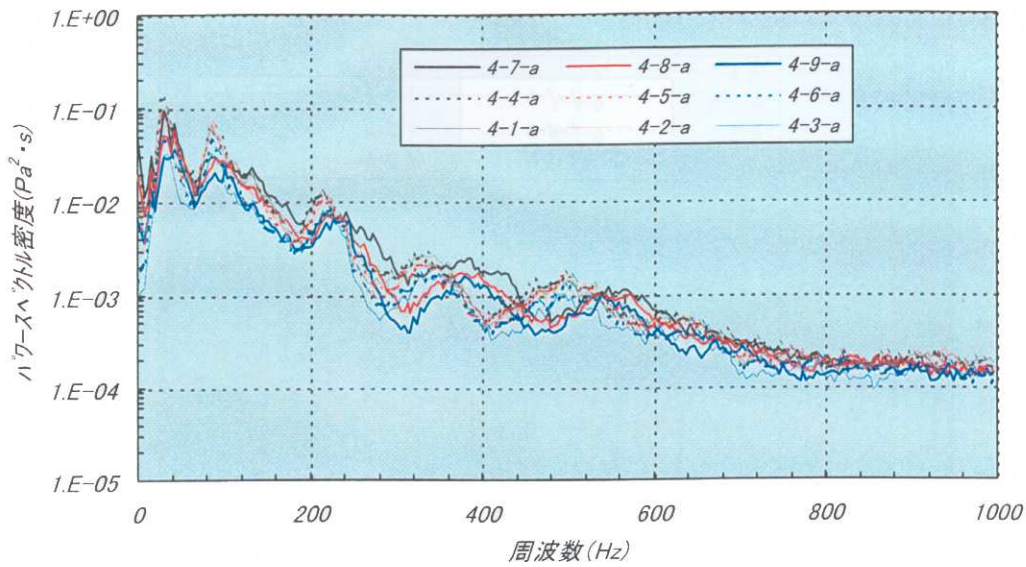


図-4.4a 4倍模型始端部発生音のパワースペクトル分布

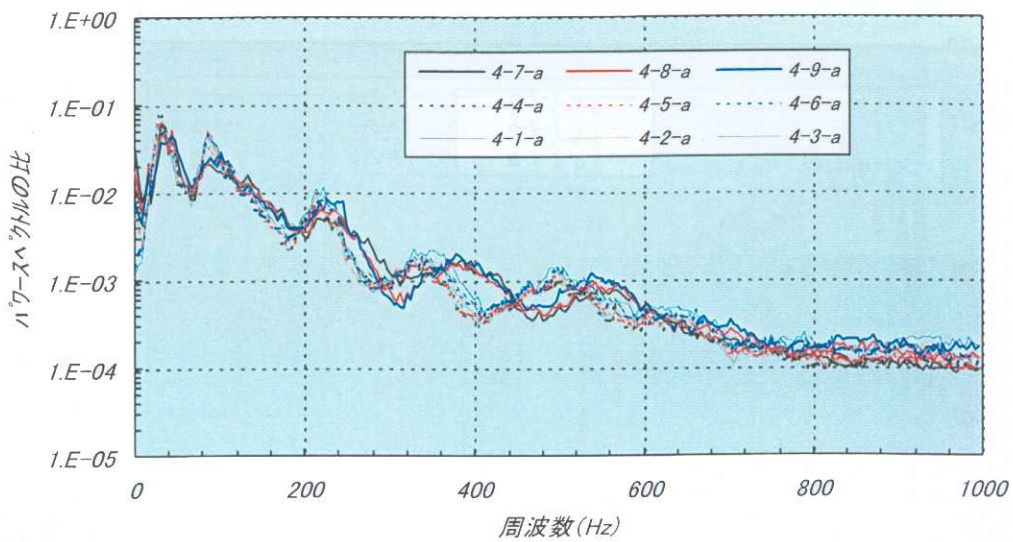


図-4.4b 4倍模型始端部発生音のパワースペクトル分布

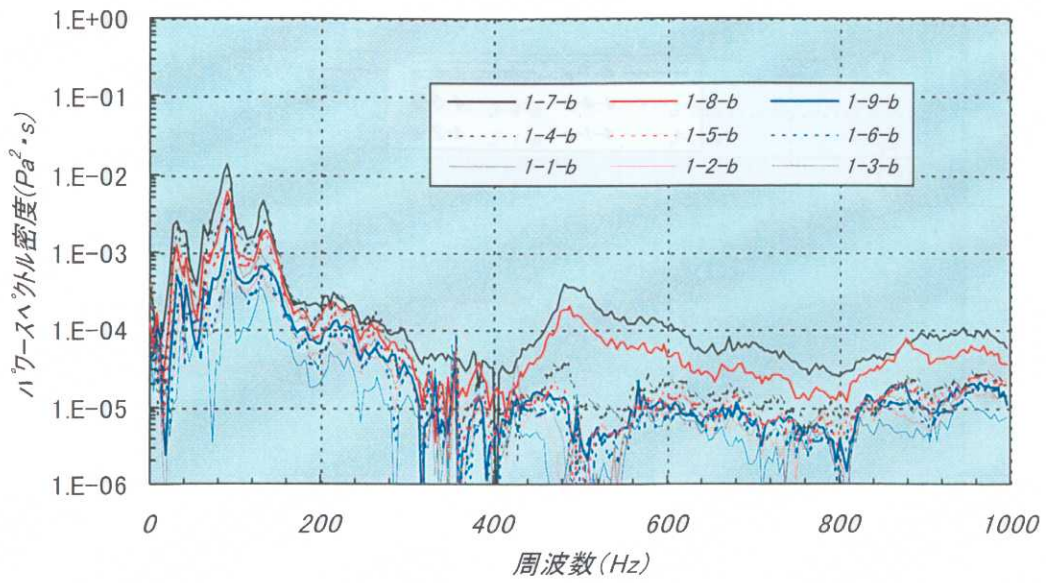


図-4.5a 1倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

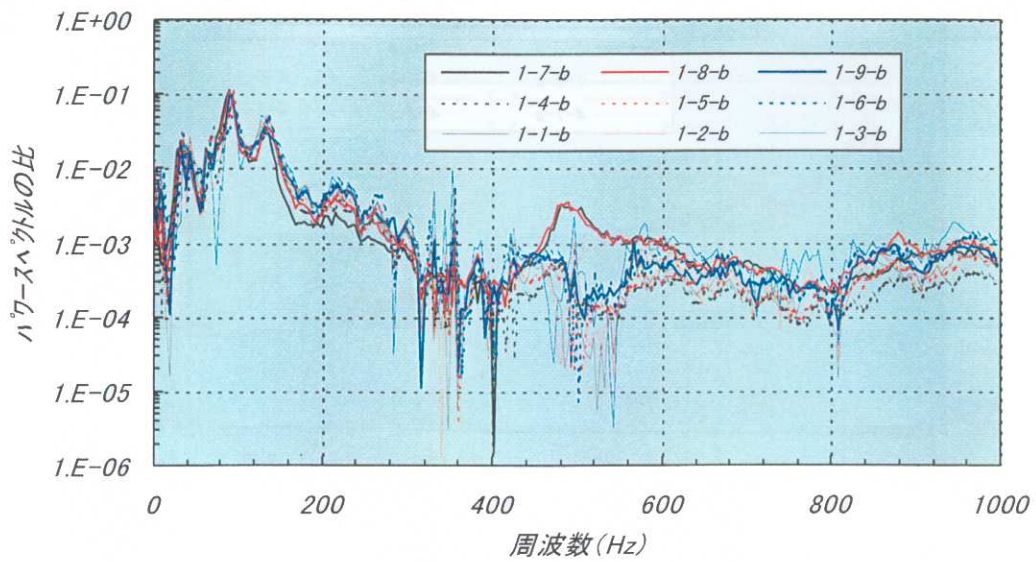


図-4.5b 1倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

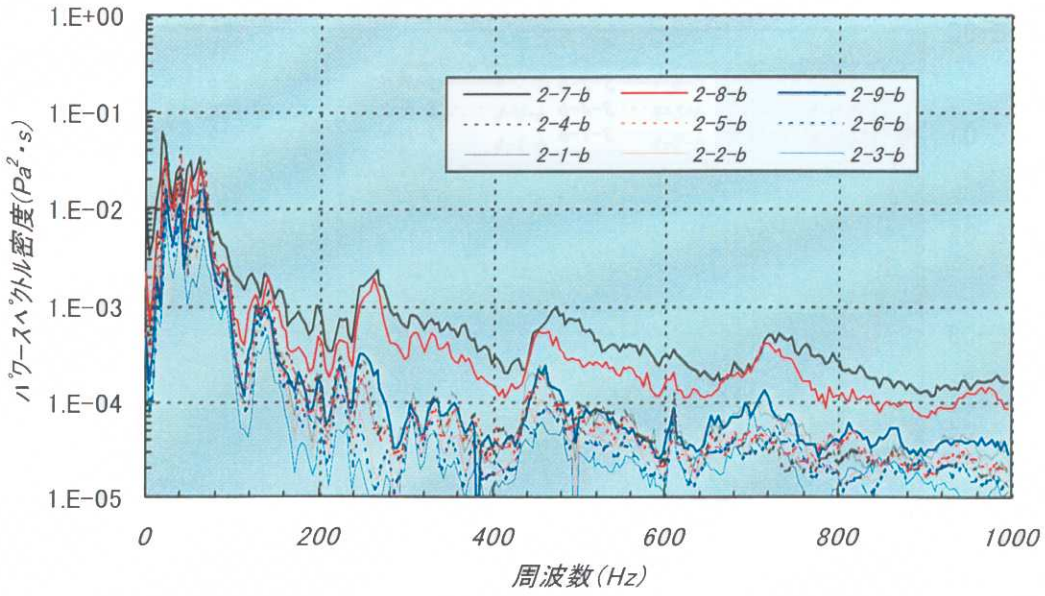


図-4.6a 2倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

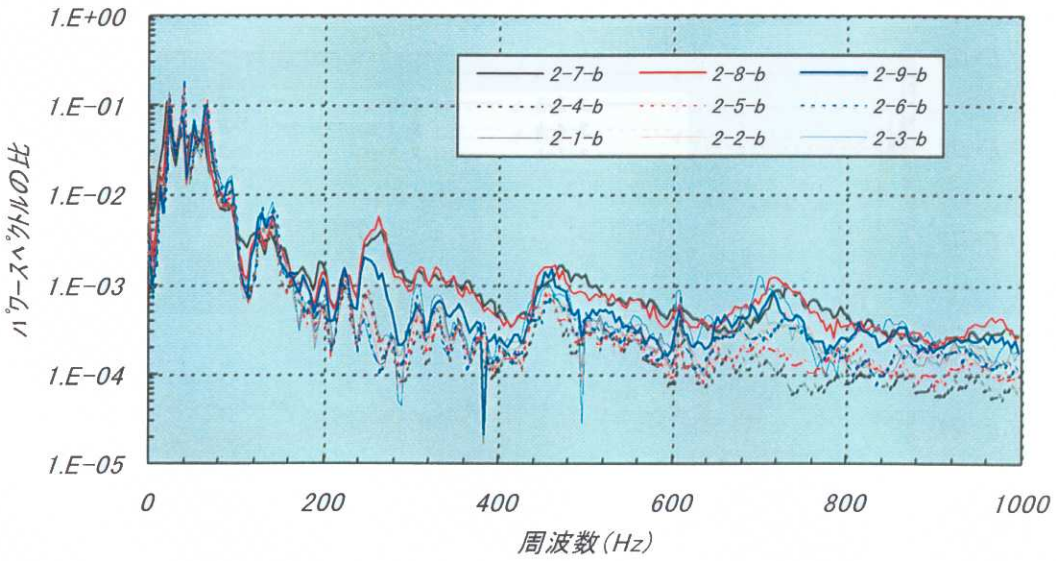


図-4.6b 2倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

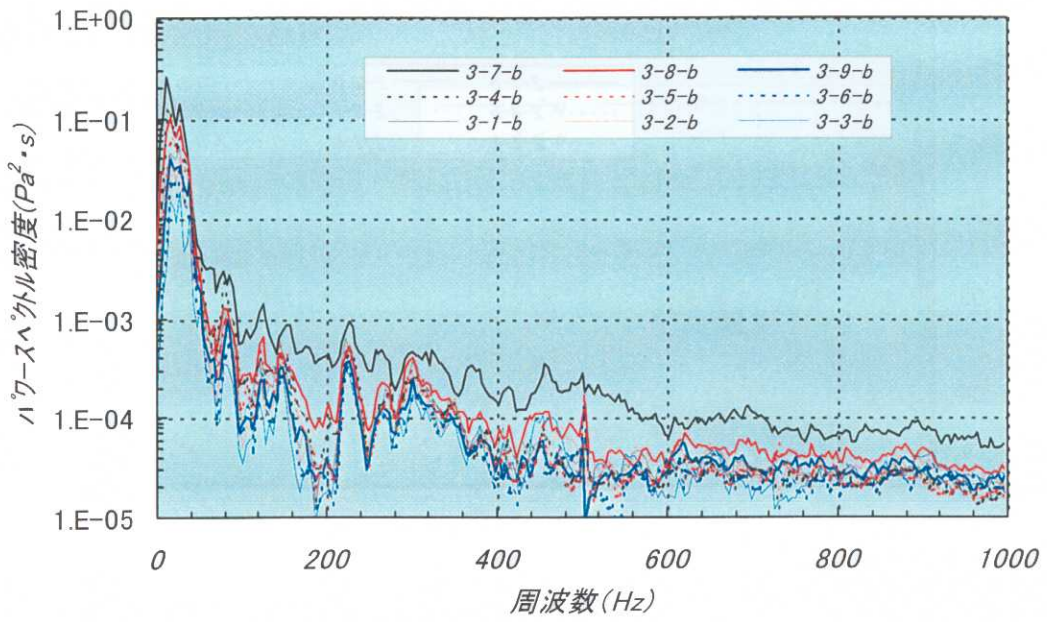


図-4.7a 3倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

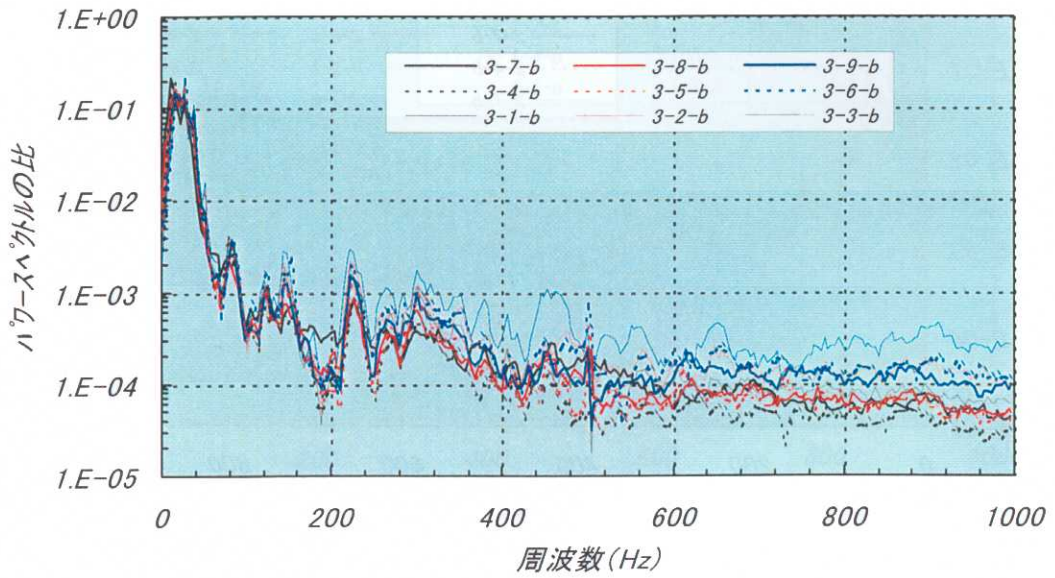


図-4.7b 3倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

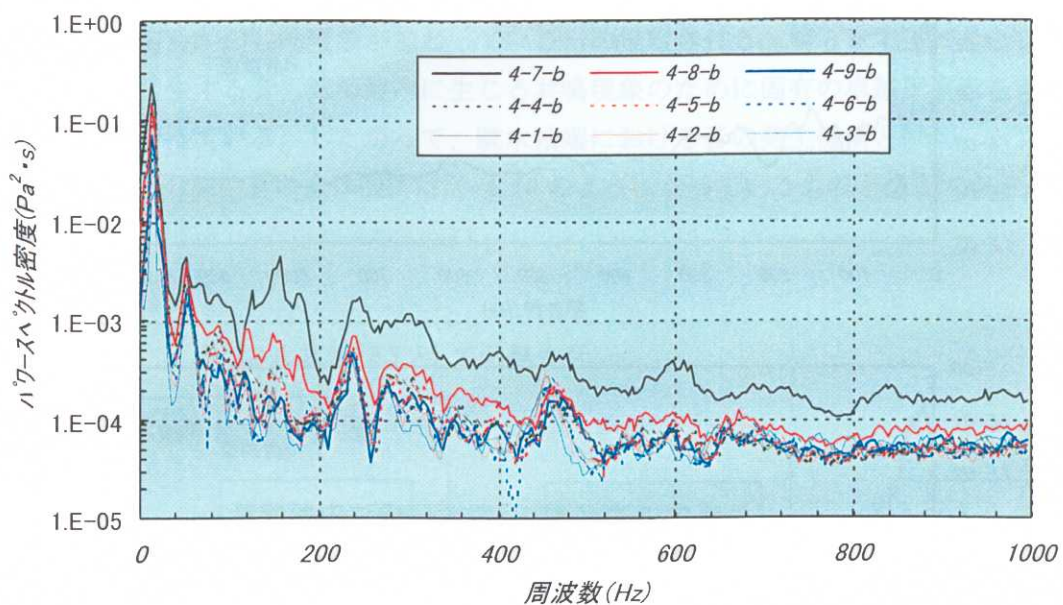


図-4.8a 4倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

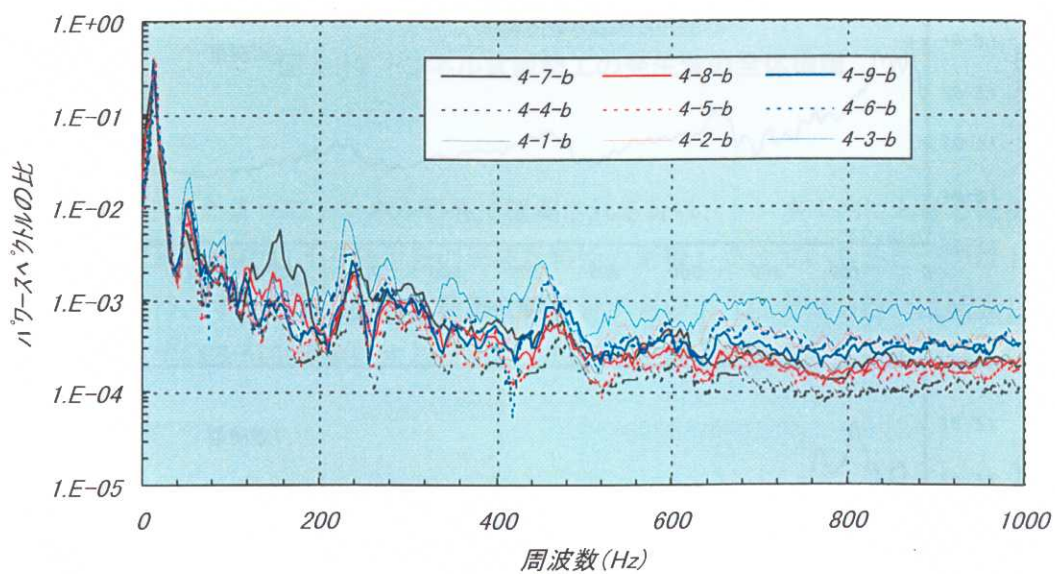


図-4.8b 4倍模型トンネル出口観測音のパワースペクトル分布

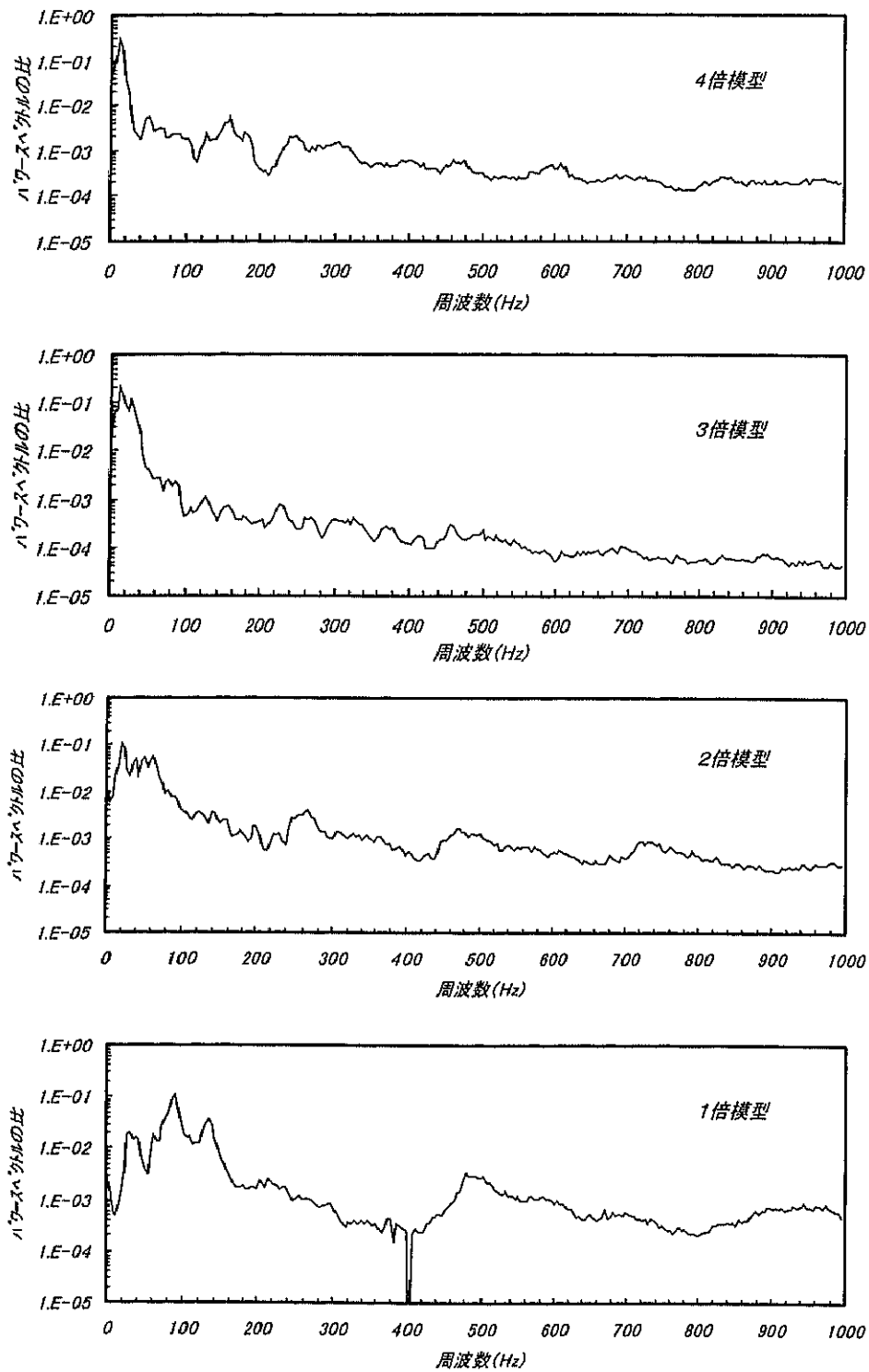


図-4.9 トンネル出口観測音のパワースペクトル分布の比較

以上から、跳水始端で発生した音に、水面と天端にはさまれた細長い空間を伝播してくる際にさらに何らかの共鳴現象が加わっているもの推定される。第3章で述べたように始端部において発生する音も減勢池内に生じる共鳴現象のために固有の卓越周波数を有する周波数特性を持っている。したがって、跳水始端における音の発生機構と併せ、トンネル式減勢工としての発生音の全体機構は図-4.10のようにになっているものと想定できる。

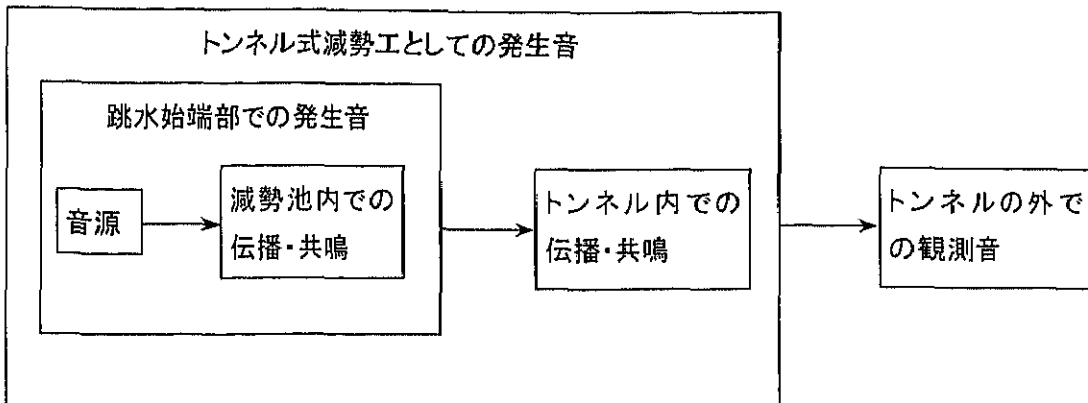


図 4-10 トンネル式減勢工の発生音の全体機構

4.3 伝播特性

図-4.10 に示したようにトンネルの外で観測される音は、トンネル内における伝播特性に加えて、跳水始端部における発生音の周波数特性の影響も受けている。ここではトンネル内での伝播特性、すなわち、各周波数毎に発生音がどのように増幅あるいは減衰して地下空間を伝播しているかを明確にするために、以下に定義する伝達率を周波数毎に求めてみる。

伝達率

＝観測音／始端部における発生音

＝天井を設けた場合の測点2の測定音

／天井を設けない場合の測点1の測定音 (4-1)

ここで、「天井を設けない場合の測点1の測定音」とは、同一放流条件における天井のないケースにおける跳水始端部直上の測定音である。

なお、天井を設けることによって、始端部における発生音そのものが変化したり、新たに別の音源が生じている可能性も否定できない。ここで用いた伝達率とは、始端部に発生した音がトンネル内を下流に伝播する際の純粋な伝達特性ではなく、天井を設けることによ

る観測音の変化を表現しているものである。ただし、天井を設けない場合の観測音として、跳水始端部直近の値を用いることによって、近似的に伝播特性を抽出していると思なせるものと考えられる。

図-4.11～13に2倍、3倍および4倍模型の各9ケースにおける伝達率を示した。両模型とも低周波数帯に明確な卓越周波数帯を持ち、No.2-7,2-8,4-7,4-8で高周波数帯にやや相違が見られるものの、流況に依らず関数形はほぼ一致する。これは、伝達率が水面と天井にはさまれた空間形状にほぼ依存し、模型形状のスケールごとに一意的に決まることを示している。高周波数帯において相違を生じている数ケースは、いずれも副ダム下流面において流れの剥離が生じており、これに起因する新たな音が加わっているものと考えられる。

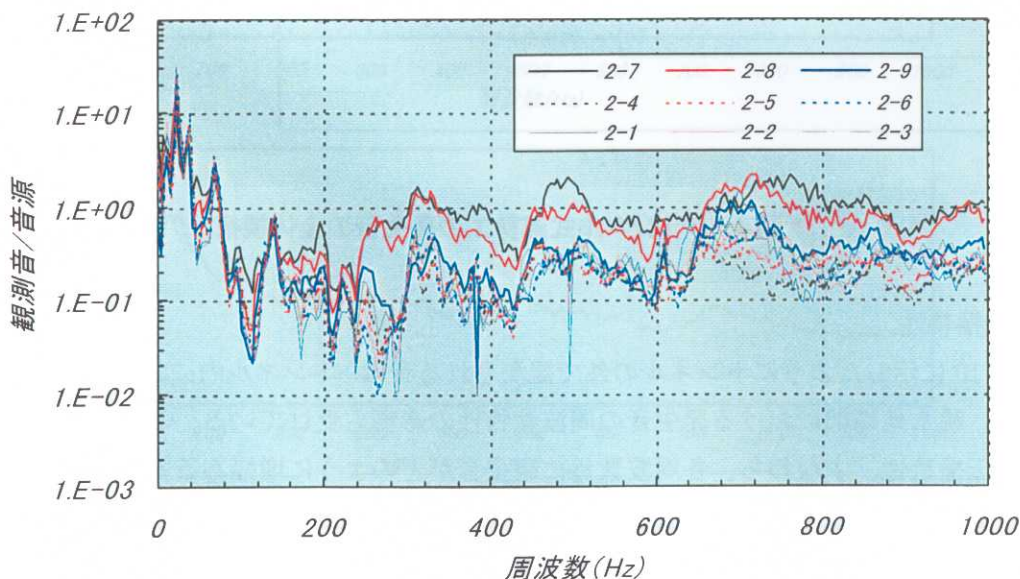


図-4.11 2倍模型伝達率のパワースペクトル分布

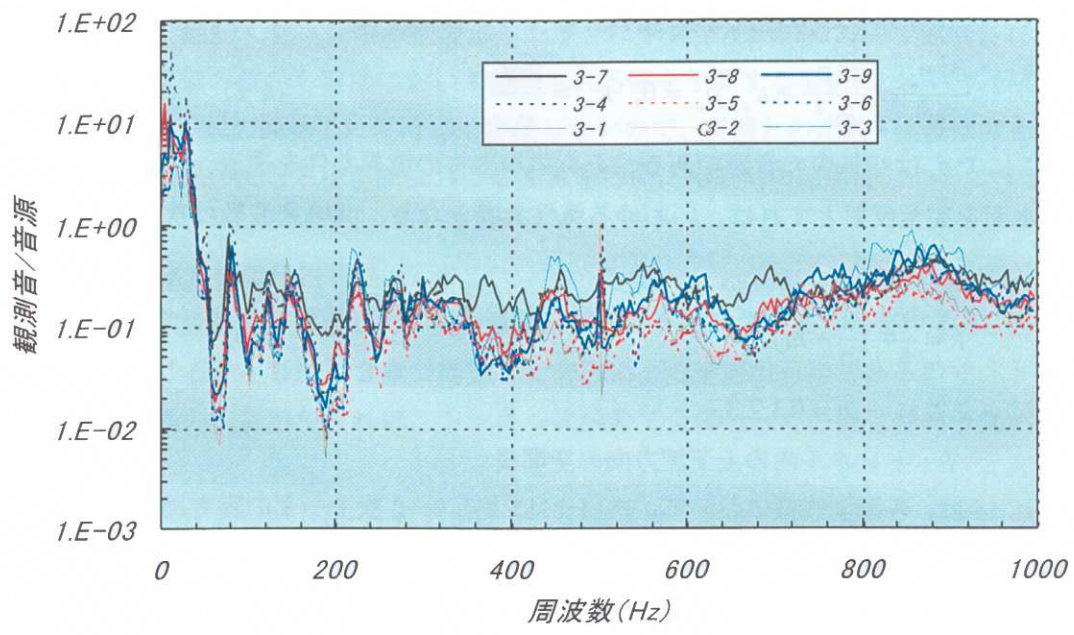


図-4.12 3倍模型伝達率のパワースペクトル分布

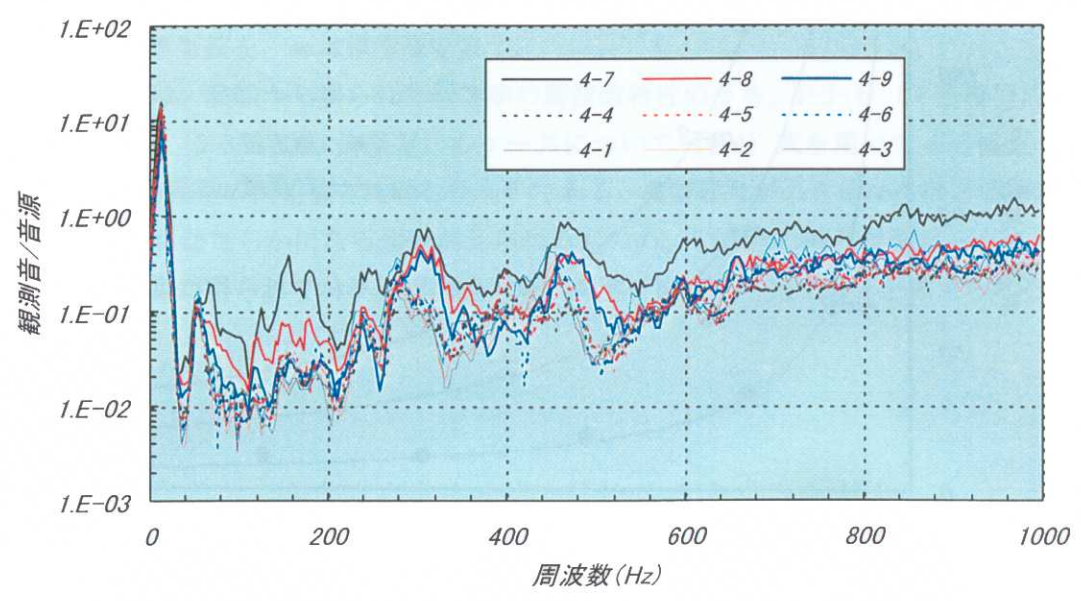


図-4.13 4倍模型伝達率のパワースペクトル分布

一方、水面とトンネルの天井に挟まれた細長い空間における音の伝播は、前節と同様以下に示すヘルムホルツの方程式で表される⁴⁾。

$$\frac{\partial^2 p_a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_a}{\partial y^2} + \kappa_a^2 p_a = 0, \quad \kappa_a = \frac{2\pi f}{c_a} \quad (4-2)$$

ここに c_a は空気中の音速である。トンネル出口の境界条件を透過、トンネル内の壁面及び水面を完全反射とすれば、いわゆる気柱共鳴となり、共鳴周波数は次式で与えられる⁵⁾。

$$f = \frac{c_a}{2 \cdot l} \left(\frac{1}{2} + m \right) \quad (4-3)$$

ここに $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

l : トンネル内の上下流方向の空間長

図-4.14 は、各模型規模において、式(4-3)による0~2次モードの固有周波数と模型実験における低周波数帯における卓越周波数を示したものである。実験における卓越周波数は、0次の固有周波数の計算値とほぼ一致しており、トンネル内の空間部分において気柱共鳴とみなせる共鳴現象が生じていることがわかる。

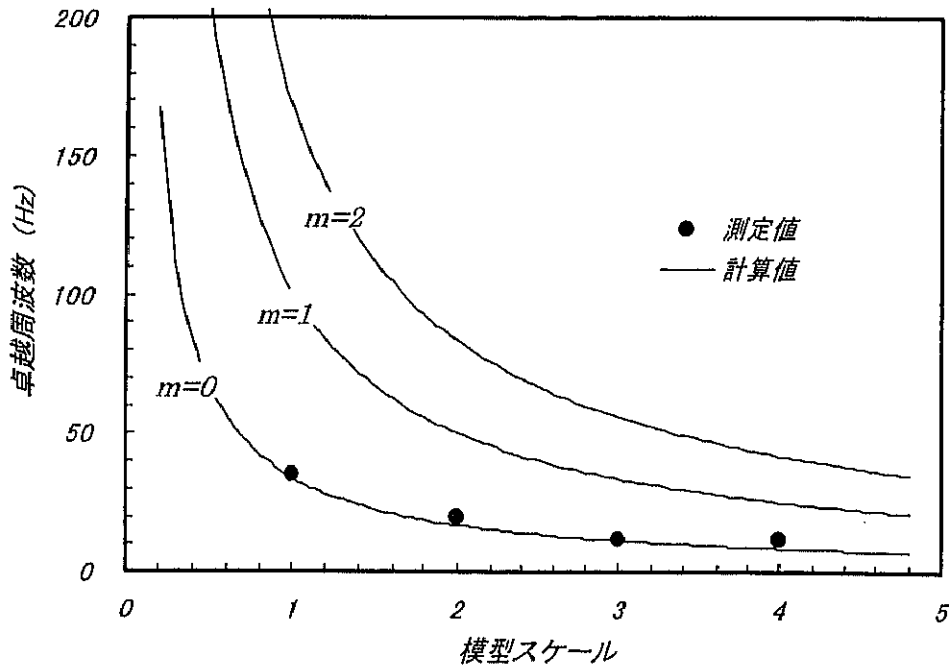


図-4.14 模型スケールと卓越周波数

4.4 トンネル式減勢工における発生音の予測手法

本節では、減勢工をトンネル構造とした場合にトンネル出口において観測される音について、模型実験の値から実機において観測される値を予測する手法についての検討を行う。なお、トンネル式の減勢工は現時点で存在しないので、実機との比較・検証はできないが、ここでは、縮尺の異なる模型間における換算を行い、相似則の適用性について検証する。

4.4.1 トンネル内の伝播特性

トンネル式減勢工全体としての発生機構が図-4.10とみなせるものとする、図中の跳水始端部における発生音は第3章で提案した方法による予測が可能であるので、トンネル内での伝播特性の換算ができれば、トンネル式減勢工全体としての発生音の予測が可能となる。

前節で述べたように、(4-1)式で定義した伝達率は、模型形状（縮尺）が同じであれば流量条件にかかわらずほぼ同様の分布形を示した。これは、伝達関数が水面と天井にはさまれた空間形状にほぼ依存し、模型形状のスケールごとに一意的に決まることを示している。また、卓越周波数が式(4-3)に従うことから、周波数については、一般に「音の相似則」と呼ばれる次式が成立するものと考えられる^{6),7)}。

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{c_a/l_p}{c_a/l_m} = \frac{1}{n} \quad (4-4)$$

ここに、 l :代表寸法、 f :周波数、 c_a :空気中の音速
添字 p は原型値を、 m は模型値を表す。

図-4.15 は、実験から得られた伝達率の周波数特性のうち、1-3-b（1倍模型）、2-3-b（2倍模型）、3-3-b（3倍模型）のケースについて(4-4)式を用いて4倍模型への換算を行い、4倍模型の測定値と比較したものである。模型縮尺が小さくなるほど低周波数帯のピーク形状がなだらかになる傾向が見られるものの、いずれの縮尺模型からもほぼ一致した卓越周波数が得られており、実用上十分な精度で換算が可能であると考えられる。

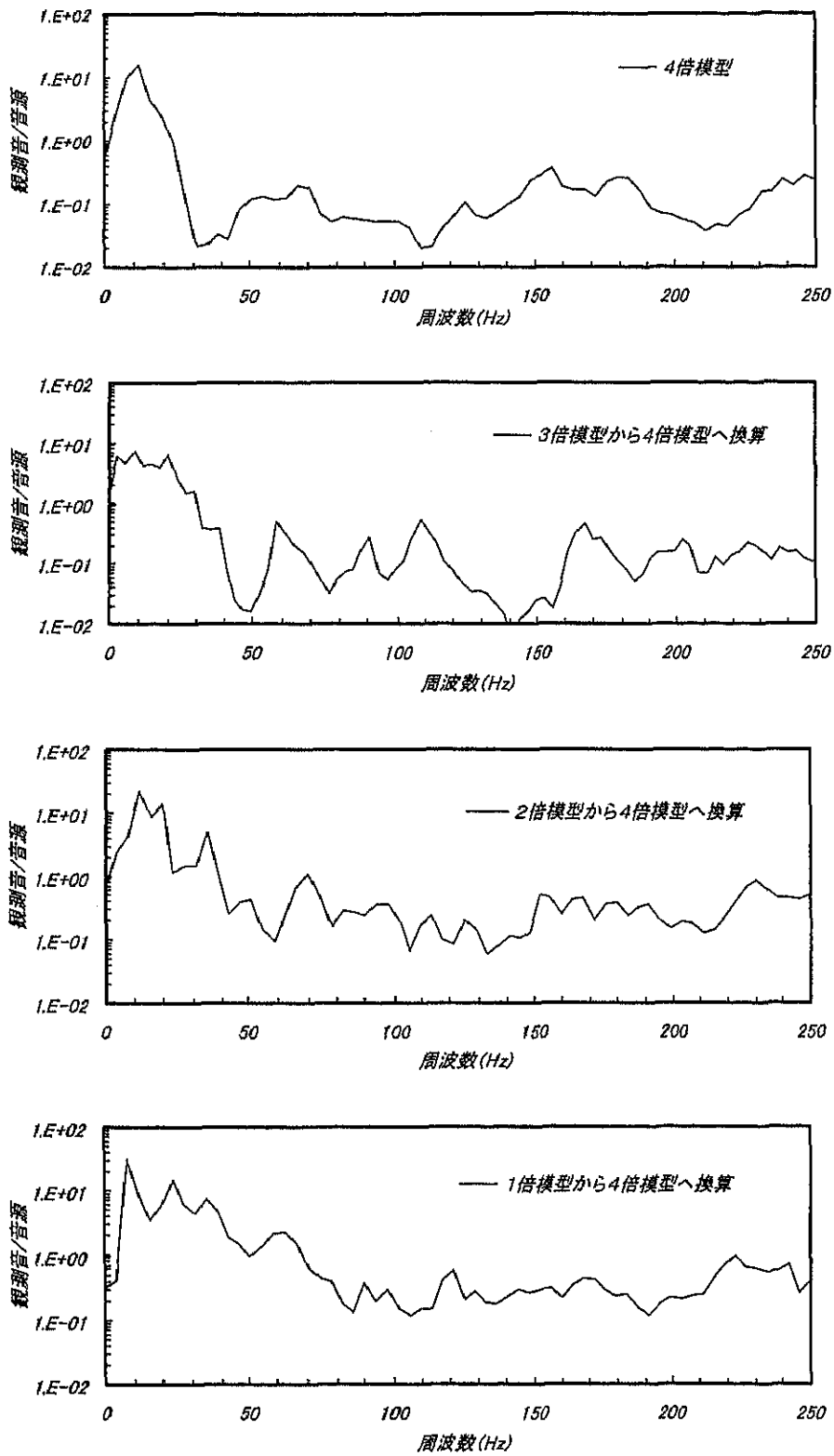


図-4.15 伝達率のパワースペクトルの換算

4.4.2 トンネル出口における観測音の予測手法

これまでの検討から、跳水始端部における発生音および伝達率についての換算方法が得られた。(4-1)式から明らかなように、トンネル出口における観測音はこれらを周波数ごとに乗じることによって得ることができる。具体的には以下の手順で水理模型実験で得られた値から原型におけるトンネル出口における観測音の推定を行うことができるものと考えられる。

- ① 上方が開放された形状の模型で水理模型実験を行い、跳水始端部における発生音の音響出力から変換効率を求める。また、発生音のパワースペクトルを求める。
- ② 実機における流入エネルギーを計算し、①で得られた変換効率を用いて実機における音源のオーバーオール値を求める。
- ③ ①で得られた模型における始端部発生音のパワースペクトルをオーバーオール値で無次元化し、これに(2-21)式の相似則を適用して始端部発生音の実機における無次元パワースペクトルを求める。これに②で求めた原型の始端部発生音のオーバーオール値を乗じて原型における音源のパワースペクトルを求める。
- ④ トンネルを設けた実験を行い、トンネル出口における観測音の模型におけるパワースペクトルを求める。これを、①で求めた音源の模型におけるパワースペクトルで対応する周波数ごとに除することによって、模型における伝達率を求める。さらに、この模型における伝達率に(5-2)式の相似則を適用して原型における伝達率を求める。
- ⑤ ③で求めた実機の跳水始端部発生音のパワースペクトルに、④で求めた実機の伝達率を対応する周波数ごとに乗じてトンネル出口における観測音のパワースペクトルの実機換算値を求める。

最後に、前節と同様縮尺の異なる模型間における換算を行い、相似則の適用性についての検証を行う。図-4.16は1-3-b(1倍模型)、2-3-b(2倍模型)、3-3-b(3倍模型)のケースにおけるトンネル出口における観測音のパワースペクトルを上述の方法によって4倍模型値へ換算し、4倍模型の測定値と比較したものである。伝達率と同様に模型縮尺が小さくなるほど低周波数帯のピーク形状がなだらかになる傾向が見られるものの、いずれの縮尺模型からもほぼ一致した卓越周波数が得られており、実用上十分な精度で換算が可能であると考えられる。

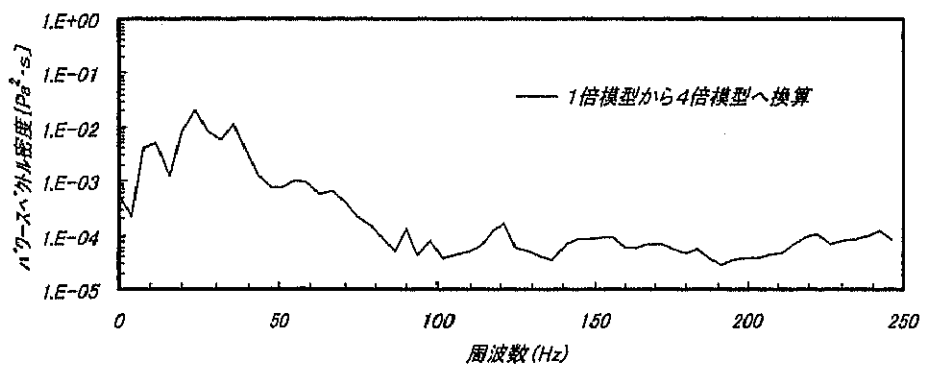
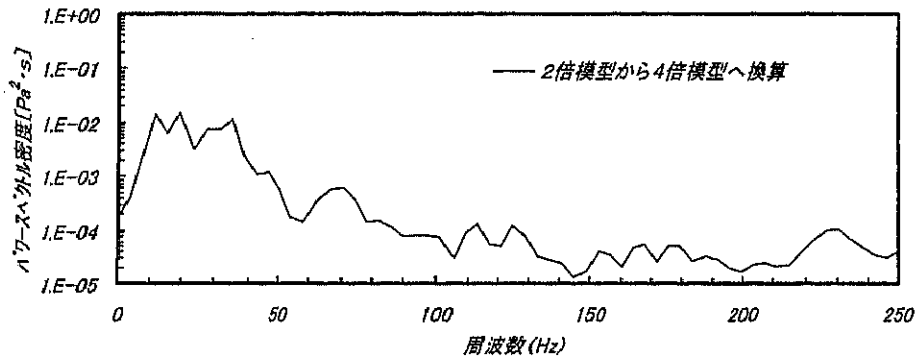
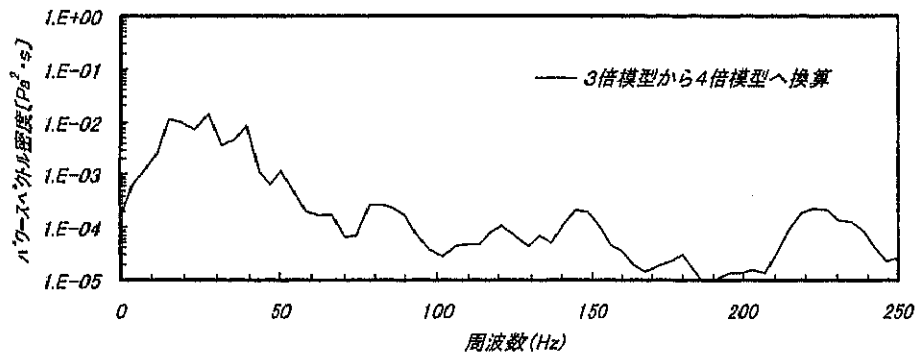
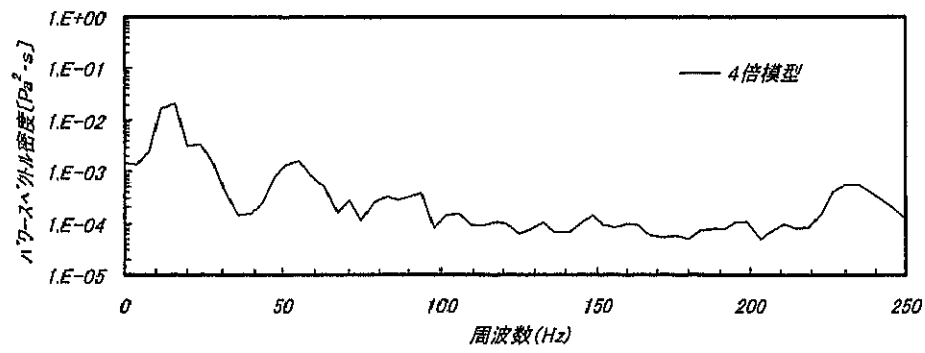


図-4.16 トンネル出口観測音のパワースペクトル密度の換算

4.5 まとめ

本章では、跳水式減勢工を地下構造とした場合を対象として、規模の異なる模型を用いた模型実験を行い、模型規模、水理学的条件とトンネル出口における観測音の周波数特性の関係および跳水始端部において発生した音がトンネル内を伝播する際の変化について把握するとともに、模型実験から実機において観測される値を予測する手法についての検討を行った。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 跳水始端部で発生した音は、トンネル内の空間部を伝播する際に共鳴を生じ、その卓越周波数は、空間部を気柱と見なした場合の共鳴周波数とほぼ一致する。
- 2) 伝達率は、空間部の形状にのみ依存し、一定の模型形状・縮尺に対して固有の関数形を持つ。
- 3) 伝達率の周波数特性は、音の相似則により模型値を実機値に換算することができる。

以上の結果および第2～3章の検討結果から、減勢工を地下に設けた場合については、地下構造としない場合の模型実験も併せて行うことにより、以下の方法によって模型値から実機の値を予測することができる。

- 4) 跳水始端部における発生音とトンネル出口における観測音の比(伝達率)を周波数毎に求める。
- 5) 模型における伝達率を音の相似則により実機の伝達率に換算する。
- 6) 第3章で述べた方法により跳水始端部における実機の発生音のパワースペクトルを求め、これに実機の伝達率を周波数毎に乗じることによりトンネル出口における観測音のパワースペクトルを求める。