

## 第1章 序章

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 ダム減勢工における音の発生

ダムに設けられる洪水吐きは、洪水時の流水を安全かつ確実に下流に流下させるための施設であるが、ダムを流下する水は大きなエネルギーを持っており、下流保護のために必要がある場合にはエネルギーを減じるための減勢工が設けられる。

減勢工には様々な型式があるが、現在、我が国で最も採用事例が多いのは、副ダムによって下流水深を確保し、水平な水叩き上に強制的に跳水を発生させる「副ダムを有する跳水式減勢工」と呼ばれる型式である（写真-1.1）。跳水は、流水が射流から常流に変化する急変現象であり、その際に生じる大きな乱れによって、その運動エネルギーや位置エネルギーの一部が、熱や音に変換されることにより、減勢効果が発揮される。

また、アーチダム等で跳水式とすることが構造上困難な場合などに採用される方式として空中放流式の減勢工がある（写真-1.2）。これは、ダムに設けた放流管等から空中に放流した水脈を一定の水深を保った減勢池に落とし、着水した水脈の噴流拡散による乱れによってエネルギーを減じるものである。

どのような形式を採るにせよ減勢は水脈の持つエネルギーの一部が熱や音に変換することによって達成されるため音の発生は避けられない。これらダム放流水の減勢時に発生する音は、人間には聞こえにくい20Hz以下の周波数成分が卓越した周波数特性を持つことが現地観測結果等から知られている<sup>1), 2)</sup>。この低周波音が大きい場合や長期に亘る場合などに周辺の建物の窓ガラスや建物内の建具を振動させる等の問題を引き起こしており、早急な現象の解明と低減対策の確立が求められている。

しかし、現時点では、ダム計画段階で、放流時の低周波音の発生がある程度予想されても、定量的な予測が困難であることや抜本的な対策が確立していないことから、設計において発生音対策が講じられることはほとんどない。そのため、運用を開始してから発生音が問題となり、対策を迫られる事例が見受けられる。しかし、ダムが完成し、運用を開始してしまうと、発生音源側での対策は一層難しくなり、結局、対策は家屋の補強等の対症療法的なものにならざるを得ない。したがって、ダムの計画・設計段階において発生音を定量的に予測し、具体的な対策を講じておくことが望ましく、そのための検討手法を確立する必要がある。

こうした水理構造物から発生する音としては、堰下流の越流水脈からの発生音がよく知られている。堰を越流する水が形成する薄い水膜とその背後空間部分に共鳴現象を生じることがあり、これが超低周波成分の卓越した音を発生させることが明らかにされている。



写真-1.1 跳水式減勢工



写真-1.2 空中放流式減勢工

水膜振動については様々な研究があるが、最近では竹林ら<sup>3),4),5)</sup>によって、音の発生機構や水理学的条件と発生音特性の関係が詳細に検討されている。また、越流部にデフレクターを設けて水膜を分断し、共鳴構造を破壊することによって低周波音の低減が可能であることが明らかになっている。これについては、角<sup>6)</sup>によって詳細な検討が行われており、流量条件に対応する適切なデフレクターの配置方法についての理論付けがなされている。

その他の水理構造物については、農業用水路における落差工、段落ち等における発生音についての研究が行われている。泉ら<sup>6),7),8)</sup>は、跳水式の落差工における発生音について、松下ら<sup>9)</sup>は、主に空中落下型式の落差工について、放流形態や流量等の水理条件と発生音等との関係を求めている。また、小田ら<sup>10),11)</sup>は床固めや砂防ダム等の砂防施設における発生音を対象として同様の検討を行っている。

しかし、ダムのような高流速、大流量の放流設備を対象とした系統だった検討はほとんど行われておらず、音源や共鳴構造の有無など音を発生する系全体としてのメカニズムは未だ解明されていない。

一方、洪水吐きの水理的な検討では、その流れが3次元的な急変流であること、個々のダムがそれぞれの地形・地質条件や放流条件に応じて設計される極めて個性の強い構造物であることから、模型実験による検討が行われている。放流時の発生音も、現時点では理論的な取り扱いが難しいこと、ダム形状の違いに応じて異なる特性が考えられること等から、発生音の予測手法として水理模型実験は有効なものと考えられる。また、ダムの水理構造物設計時には水理的な検討のために必ず模型実験が行われることから、この模型を利用して発生音の予測が行えれば経済的にも有利である。

通常、水理模型実験では、ダムにおける流れが重力の卓越する現象であることから、模型において測定された値はフルードの相似則によって原型値への換算がなされる。しかし、前述のように発生音についてはそのメカニズムや支配要因が明らかでないため、原型値への換算手法は明らかになっていない。この種の検討としては、小田ら<sup>9)</sup>が砂防施設における発生音を対象として、模型実験値と現地観測値の比較を行い、相似則についての検討を行っているが、定量的な評価には至っていない。

以上の状況に鑑み、本論文では、減勢工として代表的な形式である跳水式減勢工を取り上げ、模型実験および実際の構造物（以下、実機と言う）における発生音を測定し、その基本的な特性を分析し、音の発生メカニズムを推定するとともに、模型実験結果から実物における発生音を予測する手法の検討を行う。

### 1.1.2 減勢工における発生音の低減対策

減勢工における超低周波音は、減勢工の目的である水理学的エネルギーの減衰に伴って生じるものであるから、現行の減勢工の基本的仕組みを変えずに発生音そのものを大きく低減させることは難しい。小規模な流れを対象とした例としては、ブロック粗度等を水路に設け、跳水によらずに減勢させることによって発生音を低減する方法が泉ら<sup>10),11)</sup>により

提案されているが、ダムに生じる非常にエネルギーの大きな流れへの適用は現実的ではない。しかし、減勢工全体を地下構造物として、生じてしまった発生音のエネルギーを外部に発散させることなく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ことは、超低周波音の低減対策のひとつとして有効と考えられる。

一方、最近、景観上の目的、あるいは、ダム再開発事業において既設のダムに新たな放流設備を設ける場合に、ダム堤体に新たな放流設備を設けることが構造上困難であるとの理由から、減勢工を含む洪水吐きを地下構造物とするいわゆるトンネル式洪水吐き減勢工の計画事例が見られるようになっている。減勢工を地下構造物とするためには、跳水に伴って連行される空気量の算定や、適切な空断面の確保量の検討など、従来の減勢工にはない水理学的課題の解明が必要であるが、これらについては、現在までに鋭意様々な検討が行われてきた結果、実際の構造物の水理設計がなされるに至っている<sup>13)</sup>。

このトンネル式洪水吐き減勢工を超低周波音の低減対策として用いるためには、地下構造物とすることによって発生音をどの程度低減することができるか、発生音の周波数特性がどのように変化するか等について、定量的に評価する手法を確立することが必要である。そのために、本論文では、水理模型実験によってトンネル式洪水吐き減勢工における発生音を予測する手法の検討を行う。さらに、実際に計画されているトンネル式洪水吐き減勢工に本手法を適用し、発生音を算定するとともに、減勢工を地下構造物とすることによる発生音の低減効果を評価する。

### 1.1.3 低周波音の特性

音は、空気中を伝播する疎密波であり、その基本的な性質は音の強さ（音圧レベル）と周波数によって決定される。低周波音あるいは超低周波音の定義は特にないが、人間の耳に聞こえる音の周波数範囲は一般に20～20,000Hzと言われており、通常この可聴音域以下の周波数の音を超低周波音、また、100Hz以下の比較的周波数の低い範囲の音を低周波音と呼んでいる<sup>14)</sup>。100Hz以上の周波数の音は人間の声に多く含まれ、よく経験しているので、はっきりとした音として認識されるが、100Hz以下の周波数となると、音という感覚が徐々に減っていき、耳のまわりの圧迫感、あるいは振動のような感覚で知覚されるようになる。

超低周波音、あるいは低周波音も空気中を伝播する疎密波という意味では可聴音と全く同様な物理現象であるが、波長が非常に大きいという特性を持つ。例えば、10Hzの音の波長は常温で34mとなる。音の伝播途中に壁などの遮蔽物を置いても、遮蔽物の大きさに比較して音の波長が大きければ、音は容易に壁の裏側にまわりこむため、反射、回折などによる減衰が少ない。また、音は伝播中に空気中の摩擦によりそのエネルギーを徐々に失うが、この減衰率は周波数が高いほど大きい。このように、低周波音は可聴音に比較して伝播中に減衰しにくい性質を持っている<sup>14)</sup>。

低周波音の発生源は表-1.1に示すように多種多様であり、人工的なものとしては工場施設、交通機関等から、自然現象としては火山の噴火、滝あるいは風等から発生することが

知られている。低周波音は必ずしも特殊な発生音ではなく、車の中やオフィスビルの中など生活環境中においても、車の走行や空調などにより一般に検出される音である<sup>15)</sup>。こうした低周波音がとりわけ問題となるのは、これが非常に大きかったり、長期にわたる場合、あるいは夜間に生じる場合などである。

表-1.1 低周波音の発生源

工場施設	圧縮機、送風機、エンジン、ポンプ、振動ふるい、コンベア、ボイラ、キューボラ、クーリングタワー等及び工場建屋等の振動
交通機関	自動車、航空機、船舶、鉄道（トンネル高速進入時）道路橋等
その他	発破、ダムの放流音
自然現象	海の波、地震、雷、噴火、滝、風等

注) 出典：低周波空気振動調査報告書（昭和59年環境庁大気保全局）

低周波音が引き起こす問題は大きく以下の3つに分類される。

① 建具の振動などの物理的影響

低周波音が引き起こす問題として最も多いのは、建物の窓や建物内の建具の振動である。この建具等の振動は、低周波音による共振現象であると考えられる。振動が発生しやすい周波数や音圧レベルは、建具の構造や材質等によって異なり、一概にその範囲を示すことはできないが、これまでに種々の実験や観測例が報告されている。図-1.1 にその一例を示した<sup>14)</sup>。

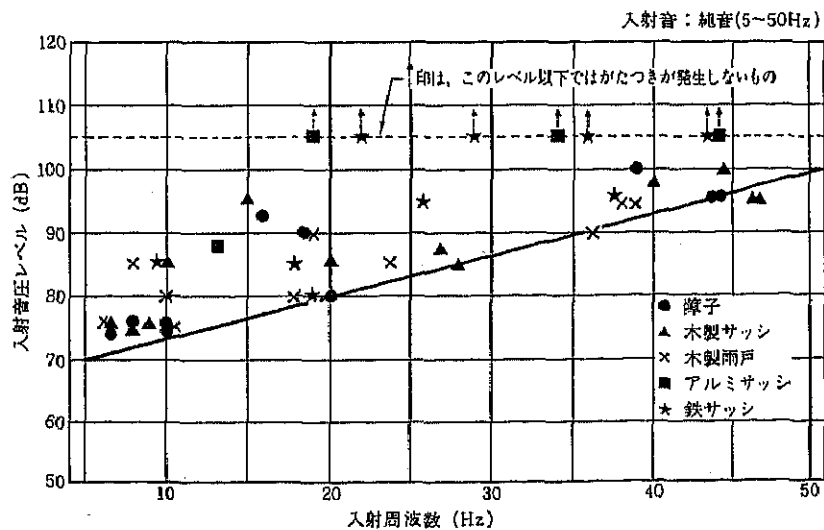


図-1.1 建具のがたつきの始まる音圧レベル

## ② 耳鳴りや頭痛などの生理的影響

耳鳴りや頭痛等低周波音が人体に及ぼす生理的な影響についても種々の研究が行われているが、低周波音と生理的影響についての明確な因果関係は得られていないが現状である<sup>15)</sup>。

## ③ 不眠などの心理的影響

建具の振動音あるいは振動や圧迫感として低周波音を知覚することにより、いらいらしたり、睡眠を妨げられるなどの心理的影響を受ける場合がある。時田ら<sup>16)</sup>の実験によると、低周波音の存在を知覚し得る閾値は可聴音感覚閾値の延長線上にあり、周波数が低いほど高くなることが確認されている。図-1.2 は、多くの研究者が種々の条件で行った感覚閾値と ISO R-226 の聴覚の閾値曲線を示した物である<sup>17)</sup>。

このように低周波は、人間の日常生活にしばしば悪影響を引き起こす。一般には、図-1.1 や図-1.2 に示した範囲以下に、ダム放流時の発生音を抑制することが対策の目標となる。しかし、低周波音がどの範囲まで問題となるかは、被害を受ける建物の構造や用途、住宅地であるか商業地域であるか等の周辺環境、音の発生時刻や継続時間等様々な要因により異なると考えられるので、最終的にはそれぞれのダムにおいて、その地域において必要とされる個別の目標値を設定し、それに向けた対策を取る必要がある。

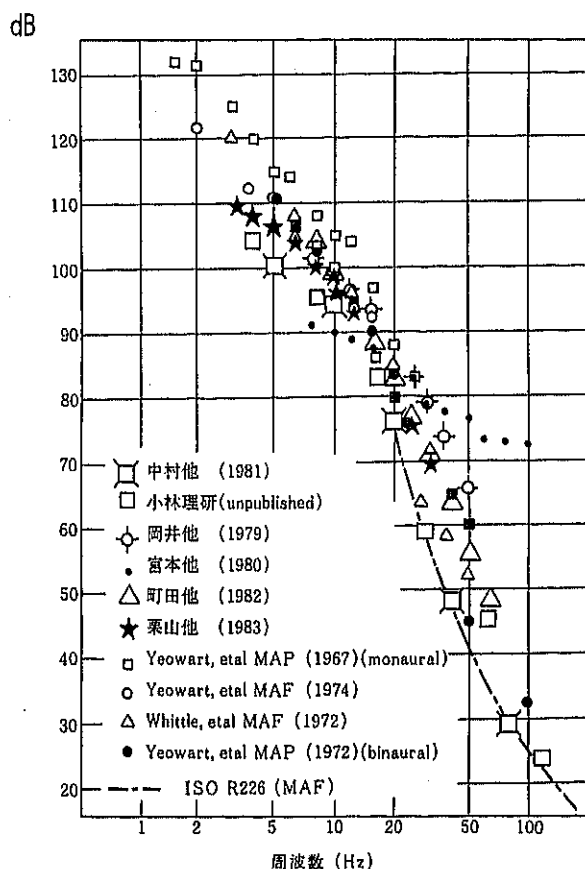


図-1.2 感覚、聴覚閾値

## 1.2 本論文の構成

本研究における検討結果は大きく以下の各項からなっている。

まず、第2章「ダム減勢工の発生音特性」では、副ダムを有する実際の跳水式減勢工において放流時の発生音の測定を行い、水理学的条件と発生音の音圧レベルや音響出力など発生音の大きさとの関係、さらに周波数特性との関係を把握する。

次に、第3章「跳水時発生音の特性とその予測手法」では、副ダムを有する跳水式減勢工を対象として、規模の異なるモデルによる発生音の測定を行い、水理学的条件、幾何学的条件と発生音の音響出力、周波数特性の関係について把握し、減勢工における音の発生メカニズムについて考察する。また、これらの結果をもとに、モデル実験から実機における発生音を予測する手法についての検討を行うとともに、実際の構造物において測定した結果との比較により、予測手法の検証を行う。

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」では、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を考える。ここでは、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、規模の異なる水理モデル実験を行い、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、実験値から実機値に換算する手法について検討する。

第5章「予測手法の適用例－トンネル式放流設備減勢工における発生音の予測－」では、第3章および第4章において提案した予測手法を適用して、天ヶ瀬ダムに新設予定のトンネル式放流設備の減勢工における発生音の音圧レベルおよび周波数特性を推定し、地下構造とすることによる超低周波音の低減効果を評価する。

最後に、第6章において、本論文における検討結果を総括するとともに、本研究の今後の展望について述べる。