

マイクロフィルム用資料

ISSN 0386-5878
土木研究所資料 第3718号

土木研究所資料

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 —

平成12年3月

建設省土木研究所
ダム部水工水資源研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

天ヶ瀬ダム水理模型実験報告書（その2） ートンネル式放流設備の発生音特性ー

水工水資源研究室 主任研究員 桜井 力
室長 柏井 条介
研究員 櫻井 寿之

要 旨

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り、放流能力増強のために左岸地山部にトンネル式放流設備の新設が計画されている。新設されるトンネル式放流設備は、流入部、口径約11m・延長約330mのトンネル部、ゲート部、トンネル内減勢工、河道とり付け部より構成される計画最大放流量 $700\text{m}^3/\text{s}$ の大規模なものであるが、減勢工における超低周波音の発生が懸念されている。本報告書は、トンネル内跳水現象により発生する低周波音の基本的な特性、その発生音圧および周波数特性を推定するために行った水理模型実験および現地観測による検討結果をとりまとめたものである。

キーワード：水理模型実験、トンネル式放流設備、空気混入、減勢工、跳水、低周波音

目 次

まえがき	1
第1章 天ヶ瀬ダム再開発計画の概要	2
1.1 既設ダムの概要	2
1.2 再開発後の天ヶ瀬ダムの治水計画（案）	2
1.3 トンネル式放流設備の概要	8
1.3.1 基本条件	8
1.3.2 新設放流設備の概要	8
第2章 検討概要	17
第3章 跳水時発生音の特性	19
3.1 目的	19
3.2 実験模型	19
3.3 放流条件	19
3.4 測定方法	25
3.4.1 音の測定	25
3.4.2 水理量の測定	25
3.5 水理量の測定結果	26
3.5.1 流入流速	26
3.5.2 流況	27
3.6 跳水音の発生位置	27
3.7 音源の特性	28
3.7.1 周波数特性	28
3.7.2 音源出力	36
第4章 トンネル内の伝播特性	38
4.1 目的	38
4.2 実験模型	38
4.3 放流条件	38
4.4 測定方法	39
4.4.1 音の測定	39
4.5 伝播音の周波数特性	40
4.6 伝播特性	40
4.7 減勢工形状による伝播音の変化	49
第5章 発生音の予測手法	53
5.1 音響実験における相似則	53

5.2 跳水時発生音（音源）の予測手法	54
5.2.1 現地観測	54
(1) 放流設備の概要	54
(2) 放流条件	54
(3) 測定方法	54
(4) 測定結果	59
(5) 変換効率の算出	61
5.2.2 跳水時発生音の予測手法の検討	62
(1) 再現実験（追加実験）	62
(2) 変換効率	65
(3) 周波数特性	66
5.3 トンネル式放流設備における発生音の予測手法	71
5.3.1 トンネル内の伝播特性	71
5.3.2 トンネル出口における観測音の予測手法	73
第6章 天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備減勢工における発生音の予測	75
6.1 水理模型実験	75
6.1.1 実験模型および放流条件	75
(1) 2次元模型実験	75
(2) 3次元模型実験	78
6.1.2 実験結果	79
(1) 2次元模型実験	79
(2) 3次元模型実験	86
(3) 2次元模型と3次元模型のトンネル内測定音の周波数特性の違い	86
6.2 音源の推定	89
6.2.1 音響出力	89
6.2.2 音源の周波数特性	90
6.3 トンネル式放流設備における発生音の推定	90
6.3.1 伝播特性	90
6.3.2 トンネル出口における観測音	94
6.3.3 トンネル式放流設備としての音響出力	96
第7章 まとめ	102
あとがき	105

図 リ ス ト

図-1.1	淀川水系流域図	3
図-1.2	洪水調節図(旧)	4
図-1.3	洪水調節図(新)	5
図-1.4	計画洪水流量配分図(旧)	5
図-1.5	計画洪水流量配分図(新)	5
図-1.6	貯水池容量配分図(旧)	6
図-1.7	貯水池容量配分図(新)	6
図-1.8	貯水位～容量曲線(旧)	7
図-1.9	貯水位～容量曲線(新)	7
図-1.10	放流設備平面図(最終案)	10
図-1.11	放流設備縦断図(最終案)	11
図-1.12	放流管部平面図(最終案)	12
図-1.13	放流管部縦断図(最終案)	13
図-1.14	減勢工部形状図(最終案)	14
図-1.15	合流部詳細図(最終案)	15
図-1.16	副ダムおよびシル詳細図(最終案)	16
図-3.1	実験模型の概要	19
図-3.2	実験模型(1倍模型)	20
図-3.3	実験模型(1.5倍模型)	21
図-3.4	実験模型(2倍模型)	22
図-3.5	流入水脈の流速分布	27
図-3.6	測定位置と水面形・音圧レベルの関係	28
図-3.7	トンネル式減勢工の発生音の系	28
図-3.8 a	1倍模型音源(始端部)のパワースペクトル分布	30
図-3.8 b	1倍模型音源(始端部)のパワースペクトル分布	30
図-3.9 a	1.5倍模型音源(始端部)のパワースペクトル分布	31
図-3.9 b	1.5倍模型音源(始端部)のパワースペクトル分布	31
図-3.10 a	2倍模型音源(始端部)のパワースペクトル分布	32
図-3.10 b	2倍模型音源(始端部)のパワースペクトル分布	32
図-3.11	気泡混入の模式図	29
図-3.12	気泡の振動周波数	35
図-3.13	ポテンシャルコア近傍の流速変動	35
図-3.14	跳水の発生音と流入エネルギーの関係	36

図-3.15	跳水時発生音と流入フルード数の関係	37
図-3.16	模型縮尺と変換効率の関係	37
図-4.1	実験模型の概要	38
図-4.2 a	0.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	41
図-4.2 b	0.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	41
図-4.3 a	1 倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	42
図-4.3 b	1 倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	42
図-4.4 a	1.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	43
図-4.4 b	1.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	43
図-4.5 a	2 倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	44
図-4.5 b	2 倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布	44
図-4.6	観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布の比較	45
図-4.7	天端高さによるパワースペクトルの変化	47
図-4.8	1 倍模型（観測音／音源）のパワースペクトル分布	47
図-4.9	1.5倍模型（観測音／音源）のパワースペクトル分布	48
図-4.10	2 倍模型（観測音／音源）のパワースペクトル分布	48
図-4.11	模型スケールと卓越周波数	49
図-4.12	1 倍模型副ダム形状	50
図-4.13	副ダム形状による流況の変化	50
図-4.14	副ダム形状によるパワースペクトルの変化	51
図-4.15 a	1 倍模型比較形状の観測音のパワースペクトルの変化	52
図-4.15 b	1 倍模型比較形状の観測音のパワースペクトルの変化	52
図-5.1	A ダム常用洪水吐き（放流量）縦断図	55
図-5.2	A ダム洪水吐き減勢工縦断図	56
図-5.3	A ダム洪水吐き平面図および測定位置図	57
図-5.4	流量と音圧レベルの関係	59
図-5.5 a	A ダム実測値の 1/3 オクターブ分析結果	60
図-5.5 b	A ダム実測値の周波数特性	60
図-5.6	流量と音響出力の関係	61
図-5.7	流量エネルギーと音響出力の関係	63
図-5.8	流量と変換効率	63
図-5.9	A ダム再現実験模型	64
図-5.10	変換効率の実測値と再現実験の比較	65
図-5.11	(5-11) 式による周波数特性の換算結果	67
図-5.12	(5-2) 式による周波数特性の換算結果	68

図-5.13	周波数特性の換算結果 (1/3 オクターブ分析)	69
図-5.14	各縮尺模型からの換算結果 (1/3 オクターブ分析)	70
図-5.15	伝達率 (観測音/音源) のパワースペクトルの換算	72
図-5.16	観測音 (副ダム直下) のパワースペクトル密度の換算	74
図-6.1	天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備減勢工再現実験模型	76
図-6.2	音圧測定位置図	77
図-6.3 a	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.071\text{m}^3/\text{s}$	80
図-6.3 b	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.071\text{m}^3/\text{s}$	80
図-6.4 a	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.060\text{m}^3/\text{s}$	81
図-6.4 b	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.060\text{m}^3/\text{s}$	81
図-6.5 a	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.050\text{m}^3/\text{s}$	82
図-6.5 b	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.050\text{m}^3/\text{s}$	82
図-6.6 a	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 開口部大	83
図-6.6 b	トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 開口部大	83
図-6.7 a	トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.071\text{m}^3/\text{s}$	84
図-6.7 b	トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.071\text{m}^3/\text{s}$	84
図-6.8 a	トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル (模型値) 開口部大	85
図-6.8 b	トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル (模型値) 開口部大	85
図-6.9 a	3次元模型におけるトンネル内測定音のパワースペクトル密度	87
図-6.9 b	3次元模型におけるトンネル内測定音の無次元パワースペクトル	87
図-6.10 a	3次元模型におけるトンネル出口測定音のパワースペクトル密度	88
図-6.10 b	3次元模型におけるトンネル出口測定音の無次元パワースペクトル	88
図-6.11	3次元模型と2次元模型のトンネル内測定音の周波数特性	86
図-6.12 a	音源のパワースペクトル (模型値)	91
図-6.12 b	音源のパワースペクトル (模型値)	91
図-6.13	音源のパワースペクトル (原型換算値)	92
図-6.14	音源のパワースペクトル (原型換算値)	92
図-6.15	伝達率の周波数分布 (模型値)	93
図-6.16	伝達率の周波数分布 (原型換算値)	93
図-6.17 a	トンネル出口観測音のパワースペクトル (原型換算値)	95
図-6.17 b	トンネル出口観測音のパワースペクトル (原型換算値)	95
図-6.18	トンネル出口観測音の1/3 オクターブ分析 (原型換算値)	97
図-6.19	トンネル出口音と音源の比較 (原型換算値)	97
図-6.20 a	流量とトンネル出口部の音圧レベルの関係 (最低水位時)	98
図-6.20 b	流量とトンネル出口部の音圧レベルの関係 (発電最低水位時)	98

図-6.20 c 流量とトンネル出口部の音圧レベルの関係（制限水位時）	98
図-6.21 a トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル（発電最低水位時）	101
図-6.21 b トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル（発電最低水位時）	101
図-6.21 c トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル（発電最低水位時）	101
図-7.1 トンネル出口観測音の 1/3 オクターブ分析（原型換算値）	103

表 リ ス ト

表-1.1	ダムおよび貯水池の諸元	4
表-3.1	実験条件一覧	24
表-4.1	実験条件一覧	39
表-5.1	Aダム実測値	58
表-5.2	Aダム再現実験	62
表-6.1	模型および原型における水理量の対応表	75
表-6.2	トンネル出口水位計測結果	78
表-6.3	3次元模型実験流量条件及び音圧測定結果	78
表-6.4	2次元模型実験音圧測定結果	79
表-6.5	トンネル出口における観測音のオーバーオール値	94
表-6.6	音源音圧とトンネル出口観測音圧の比（伝達率 ε ）	96
表-6.7	トンネル式減勢工から放出される音響出力	99
表-7.1	音源音圧とトンネル出口観測音圧の比（伝達率 ε ）	103
表-7.2	トンネル出口における観測音のオーバーオール値	103
表-7.3	トンネル式減勢工から放出される音響出力	104

写 真 リ ス ト

写真-3.1	模型完成状況 (1 倍模型)	23
写真-3.2	模型完成状況 (1.5 倍模型)	23
写真-3.3	模型完成状況 (2 倍模型)	23
写真-3.4	1/2 模型副ダム原形状の流況 ($D=43.5\text{cm}$, $h_1=1.5\text{cm}$, $Z=1.5\text{m}$)	33
写真-3.5	1/2 模型副ダム原形状の流況 ($D=43.5\text{cm}$, $h_1=2\text{cm}$, $Z=1.5\text{m}$)	33
写真-3.6	1/2 模型副ダム原形状の流況 ($D=43.5\text{cm}$, $h_1=3\text{cm}$, $Z=1.5\text{m}$)	33
写真-3.7	1/1 模型副ダム原形状の流況 ($D=87\text{cm}$, $h_1=3\text{cm}$, $Z=3\text{m}$)	34
写真-3.8	1/1 模型副ダム原形状の流況 ($D=87\text{cm}$, $h_1=4\text{cm}$, $Z=3\text{m}$)	34
写真-3.9	1/1 模型副ダム原形状の流況 ($D=87\text{cm}$, $h_1=6\text{cm}$, $Z=3\text{m}$)	34

まえがき

本報告書は、天ヶ瀬ダムのトンネル式放流設備に関する水理模型実験の検討結果のうち地下式減勢工において発生する低周波音に関する検討をとりまとめたものである。

天ヶ瀬ダムは、昭和39年に淀川水系宇治川に建設された洪水調節・京都府への水道用水の供給・天ヶ瀬発電所における発電を目的としたアーチ式コンクリートダムであるが、昭和46年の「淀川水系工事实施基本計画」の改定により、ダムの運用法の変更が計画され、新設放流設備による放流能力の増強が必要となっている。アーチ式ダムでは、既設のダム堤体に放流設備を設置することが困難と考えられたことから、このための施設として地山内に設けるトンネル式放流設備が計画されている。本施設は、最大放流量 $700\text{m}^3/\text{s}$ の大規模施設であり、河道との取り合いの関係や景観の関係から減勢工部も含めて、トンネル構造とすることとされている。

本報告書は、天ヶ瀬ダムで計画されている新設のトンネル式放流設備の減勢工において放流時に発生する低周波音について、その発生音圧および周波数特性を推定するために行った水理模型実験および現地観測による検討結果をとりまとめたものである。

第1章 天ヶ瀬ダム再開発計画の概要

1.1 既設ダムの概要

琵琶湖から流出する河川は瀬田川ただ一つである。瀬田川は瀬田川洗堰の直下流で大戸川を合わせ鹿跳で大石川・信楽川を集めて京都府に入ると、宇治川と呼ばれる。天ヶ瀬ダムから宇治市を経て山城盆地を流下して八幡市に至る宇治川は、ここで宇治川・桂川・木津川の三川が合流して淀川となって、大阪平野を南西へ流下して大阪湾に注いでいる。(図-1.1) この流域は、近畿地方における社会・経済・文化の基盤として、京都を始め、古代より数々の都が栄え、日本史の舞台となってきた。

昭和28年の台風13号は、淀川に未曾有の大洪水をもたらし、宇治川は破堤し、沿岸地域に莫大な被害をもたらした。これを契機として淀川水系の治水計画を抜本的に改定する必要性が生じ、天ヶ瀬ダム等による洪水調節を根幹とする「淀川水系改修基本計画」が昭和29年に策定され、ダム建設の運びとなった。

天ヶ瀬ダムは、この計画に基づき淀川の洪水調節・京都府への水道用水の供給・天ヶ瀬発電所における発電を目的として昭和34年に着工し、総工費65億円を投じて昭和39年に完成した多目的ダムである。既設の天ヶ瀬ダムの洪水調節方法は基準点である枚方の計画高水流量を $6,950\text{m}^3/\text{s}$ とするため、大雨が降る前に予備放流により、あらかじめ天ヶ瀬ダムの水位を最大で標高58.0mの間で低下させ、上流から流れ込んでくる計画高水流量 $1,360\text{m}^3/\text{s}$ の洪水を $900\text{m}^3/\text{s}$ に調節して放流するものである(表-1.1、図-1.2, 図-1.4)。

1.2 再開発後の天ヶ瀬ダムの治水計画(案)

淀川本川枚方地点の基本高水流量を $17,000\text{m}^3/\text{s}$ 、計画高水流量を $12,000\text{m}^3/\text{s}$ とし、その差 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ について天ヶ瀬ダムをはじめとする上流ダム群で調節する(図-1.5)。

天ヶ瀬ダムは、ダム地点の計画高水流量 $2,300\text{m}^3/\text{s}$ のうち $1,100\text{m}^3/\text{s}$ の洪水調節を行い、宇治地点の計画高水流量 $1,200\text{m}^3/\text{s}$ を安全に流下させる。また、琵琶湖の後期放流時の最大流入量 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ を安全に流下させる(図-1.3)。

天ヶ瀬ダムの洪水調節方式は、変則一定率一定量方式とし、洪水調節開始流量は、 $900\text{m}^3/\text{s}$ ($840\text{m}^3/\text{s}$)、計画最大放流量は、 $1,200\text{m}^3/\text{s}$ ($1,140\text{m}^3/\text{s}$)である。

淀川本川洪水時において、枚方地点の水位が、計画水位に達すると予測される場合には、2次調節を行う。2次調節の放流量は $660\text{m}^3/\text{s}$ ($600\text{m}^3/\text{s}$)である。洪水調節のあとは、速やかに制限水位O.P. 72mまで貯水位を低下させる。

注)()書きは、関西電力宇治発電所放流量 $60\text{m}^3/\text{s}$ を除いた流量であり、同発電所運転時のダム放流量は()書きの値となる。

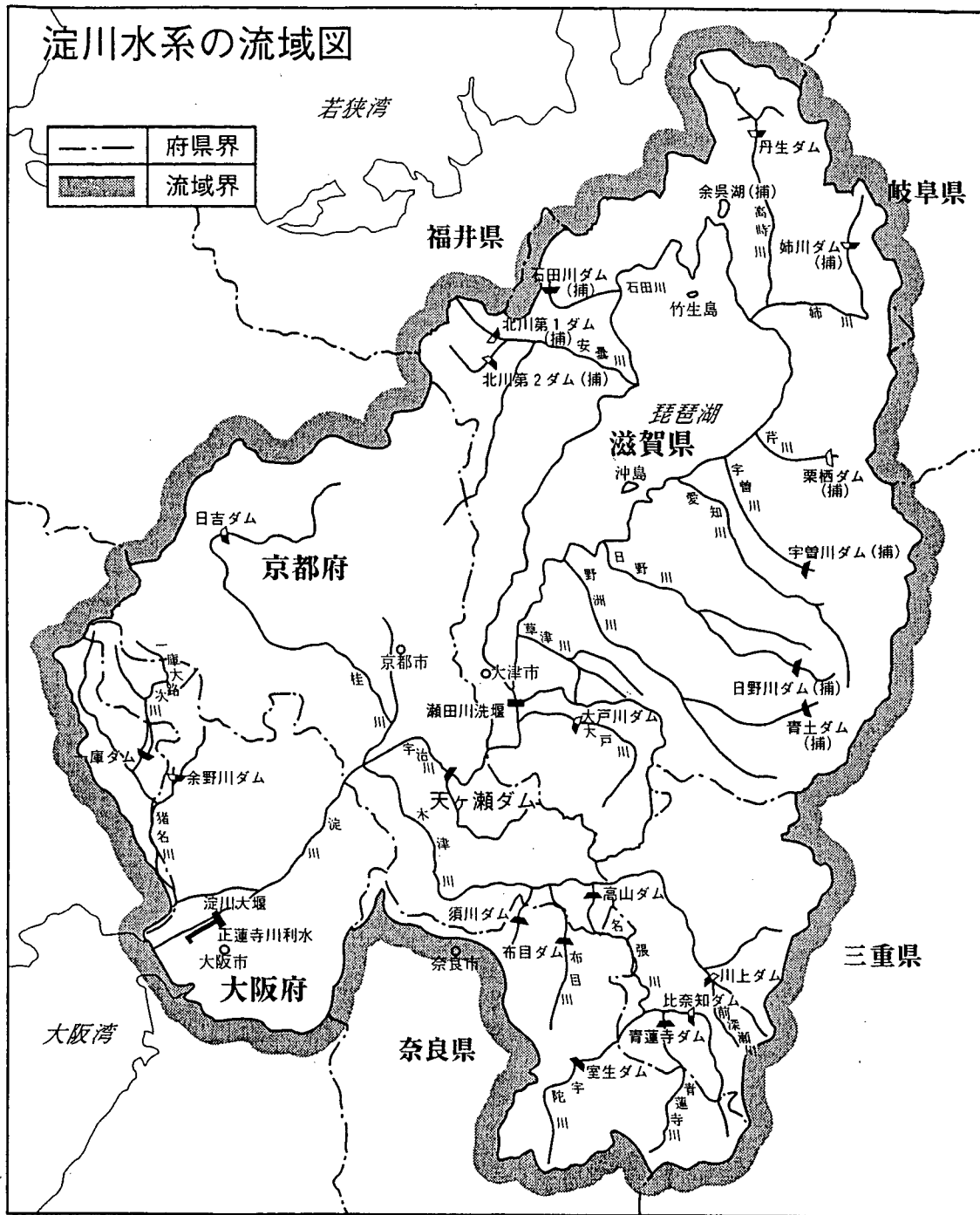


図-1.1 淀川水系流域図

「天ヶ瀬ダム再開発事業」パンフレット建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所より転載

表-1.1 ダムおよび貯水池の諸元

河川名	淀川水系／宇治川	
位置	左岸：宇治市槇島町六石山 右岸：宇治市槇島町槇尾山	
流域面積	琵琶湖流域：3,848km ² (内湖面積：674km ²)	
型式	計（全流域）：4,200km ²	
堤長	ドーム型 アーチ式コンクリートダム	
堤高	254m	
常用放流設備	73m	
非常用放流設備	3門：放流量 1,110m ³ /s（能力）	
渇水面積	4門：放流量 680m ³ /s（能力）	
常時満水位	1.88km ²	
洪水期制限水位	O.P.	78.5m
最低水位	O.P.	72.0m（6/16～10/15）
発電最低水位	O.P.	58.0m
利用水深	O.P.	68.6m
総貯水容量	20.5m	
有効貯水容量	26,280,000m ³	
治水容量	20,000,000m ³	
利水容量	20,000,000m ³	
発電容量	600,000m ³	
	洪水期：	3,800,000m ³ （6/16～10/15）
	非洪水期：	13,480,000m ³

注）O.P.とはT.P.（東京湾平均海面）+1.3mである。

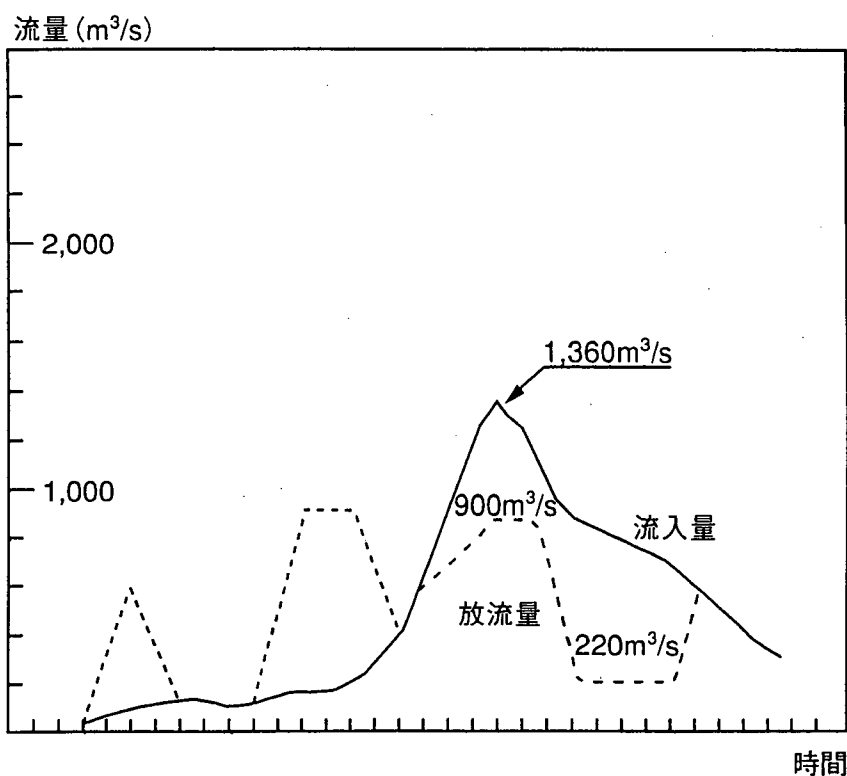


図-1.2 洪水調節図（旧）

「天ヶ瀬ダム再開発事業」パンフレット建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所より転載

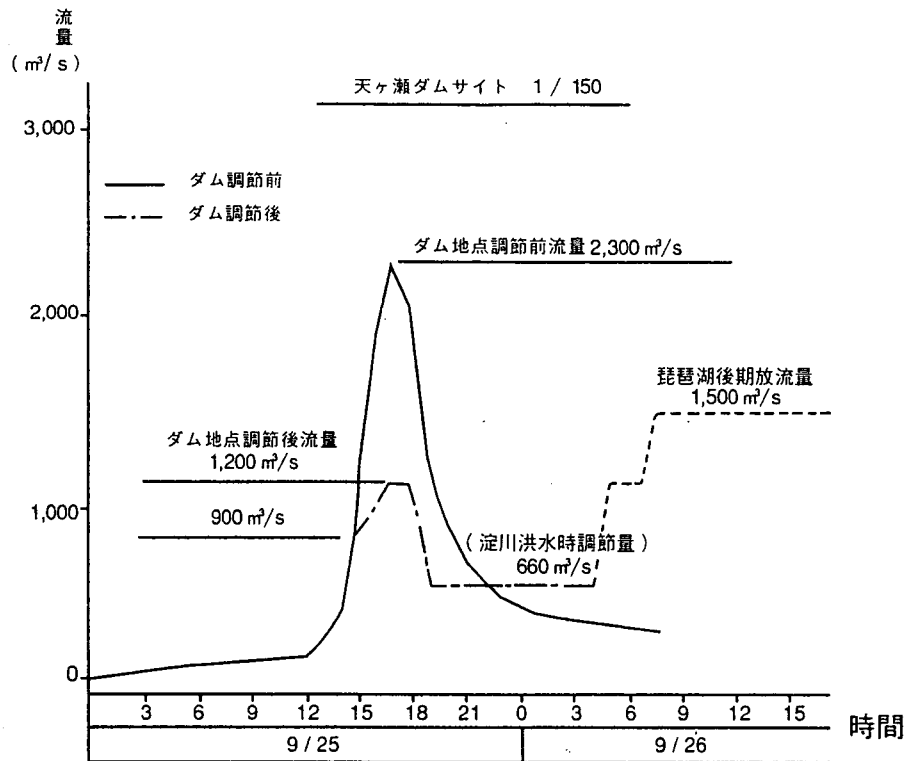


図-1.3 洪水調節図 (新)

< 旧 >

本洪水時 (単位: m^3/s)

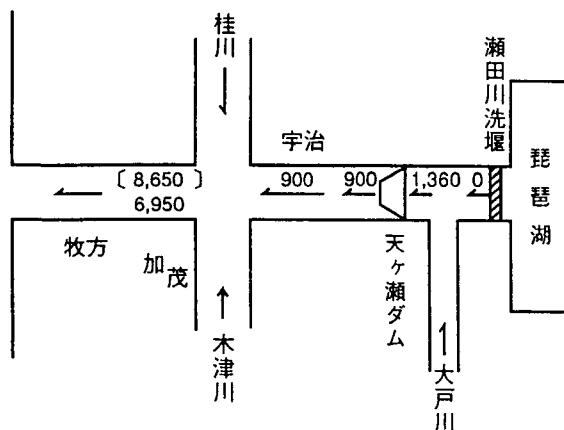


図-1.4 計画洪水流量配分図 (旧)

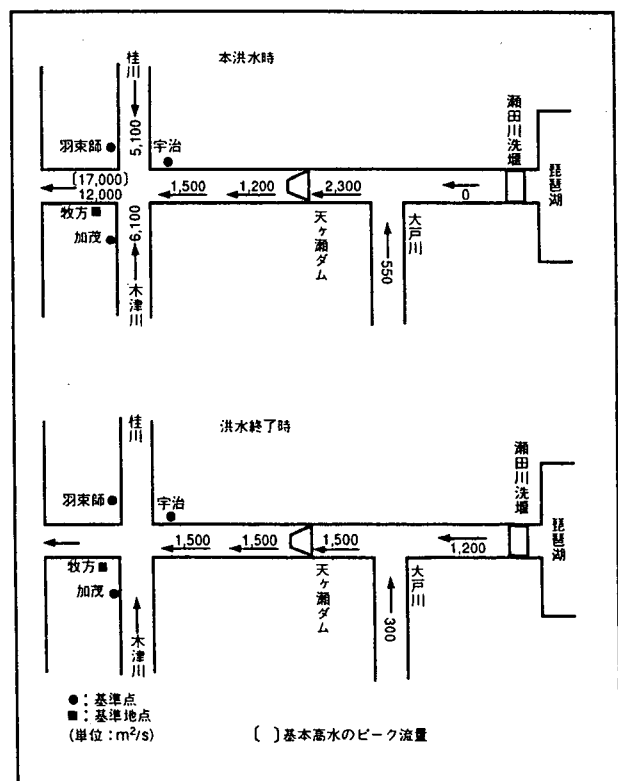
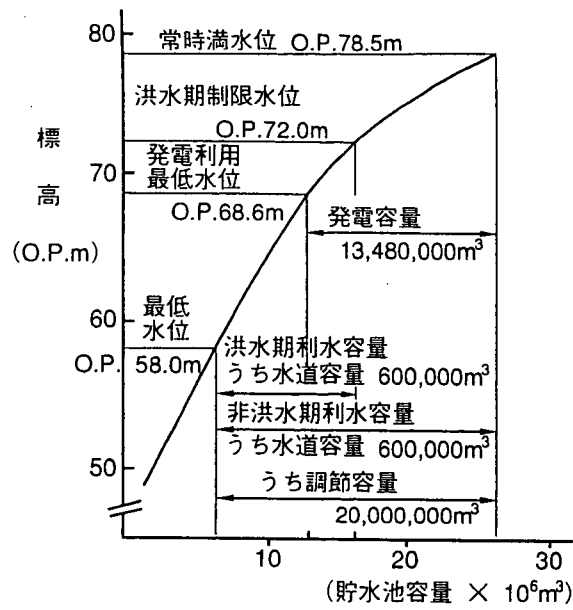


図-1.5 計画洪水流量配分図 (新)

〔旧〕



(1) 貯水位—容量曲線

図-1.8 貯水位～容量曲線 (旧)

〔新〕

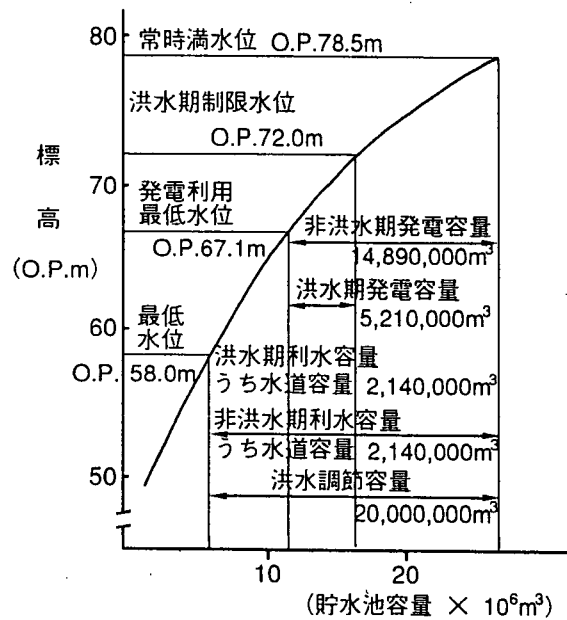


図-1.9 貯水位～容量曲線 (新)

1.3 トンネル式放流設備の概要

1.3.1 基本条件 治水計画変更によって天ヶ瀬ダムに必要とされる水理条件は以下のとおりである。

サーチャージ水位、常時満水位	: O.P. 78.5m
制限水位	: O.P. 72.0m
発電最低水位	: O.P. 67.1m
最低水位（迎洪水位）	: O.P. 58.0m
琵琶湖後期放流流量	: 1,500 m^3/s
（トンネル放流設備分担量）	（700 m^3/s ）
ダム地点調節後流量	: 1,200 m^3/s
淀川洪水時調節開始流量	: 900 m^3/s
（トンネル放流設備分担量）	（300 m^3/s ）

注）・琵琶湖後期放流：洪水後に琵琶湖の水位を速やかに下げるために行う放流

・O.P.：大阪湾の平均海面を基準（0m）とした標高（O.P.=T.P.+1.3m）

この変更によって以下に示す放流能力の増加が必要となった。

①最低水位O.P.58.0mにおいて300 m^3/s を放流可能なこと

最低水位（迎洪水位）O.P.58.0mにおいて、洪水調節開始流量である900 m^3/s までは、「流入量＝放流量」の操作を行わなければならないが、既存の放流設備は、貯水位O.P.58.0mにおいて600 m^3/s の放流能力しかないため、不足分300 m^3/s を、新設する放流設備によって放流する必要がある。

②発電最低水位O.P.67.1mにおいて700 m^3/s を放流可能なこと

洪水終了後、琵琶湖の水位を下げるために、制限水位O.P.72.0m～発電最低水位O.P.67.1m（天ヶ瀬ダム貯水池を下池とする揚水発電により水位変動）の水位において、琵琶湖後期放流流量1,500 m^3/s を放流する必要があるが、既存の設備では、O.P.67.1mにおいて、800 m^3/s の放流能力しかないため、不足分700 m^3/s を新設する放流設備によって放流する必要がある。

なお、上記の条件のうち放流能力からみると、後者の条件がより厳しいものとなっている。

1.3.2 新設放流設備の概要

アーチ式ダムでは、既設のダム堤体に新た放流設備を設けることが構造上困難であることから、放流能力を増強するための新規放流施設は地山内に設けるトンネル式放流設備で計画されている。本施設は、最大放流量700 m^3/s の大規模施設であり、河道との取り合いや景観上の観点から減勢工部も含めて、トンネル構造としている。

新規に設けられる放流設備は、流入部、圧力管路部、ゲート部、放流管部および減勢工部からなる。これらの一連の放流設備の水理的な検討結果については「土木研究所資料第3623号天ヶ瀬ダム水理模型実験」（平成11年3月水工水資源研究室）に詳細を示した。ここでは、これらの検討により求められたトンネル式放流設備減勢工の最終形状についてのみ示した（図-1.10～16）。本報告の検討対象である減

勢工は、図-1.14に示したように水平水叩き上に跳水を発生させる「水平水叩き式減勢工」の形式が採られており、二次減勢工までをトンネル内に設ける構造となっている。水理的には、琵琶湖の後期放流が長期に渡ることから十分安定した減勢状況が得られること、また、トンネル内であることから上部の空断面が十分に確保され、断面の閉塞が生じないこと等に留意して形状が定められている。

なお、本報告で述べる発生音の検討は水理的な検討と平行して実施している。したがって、次章以降に述べる跳水時発生音の基礎的な検討に用いた模型形状は最終形状とは若干異なっているが、これらの検討結果を用いて、主に水理的な検討結果から決定した最終形状を対象として放流時の発生音の推定を行っている。

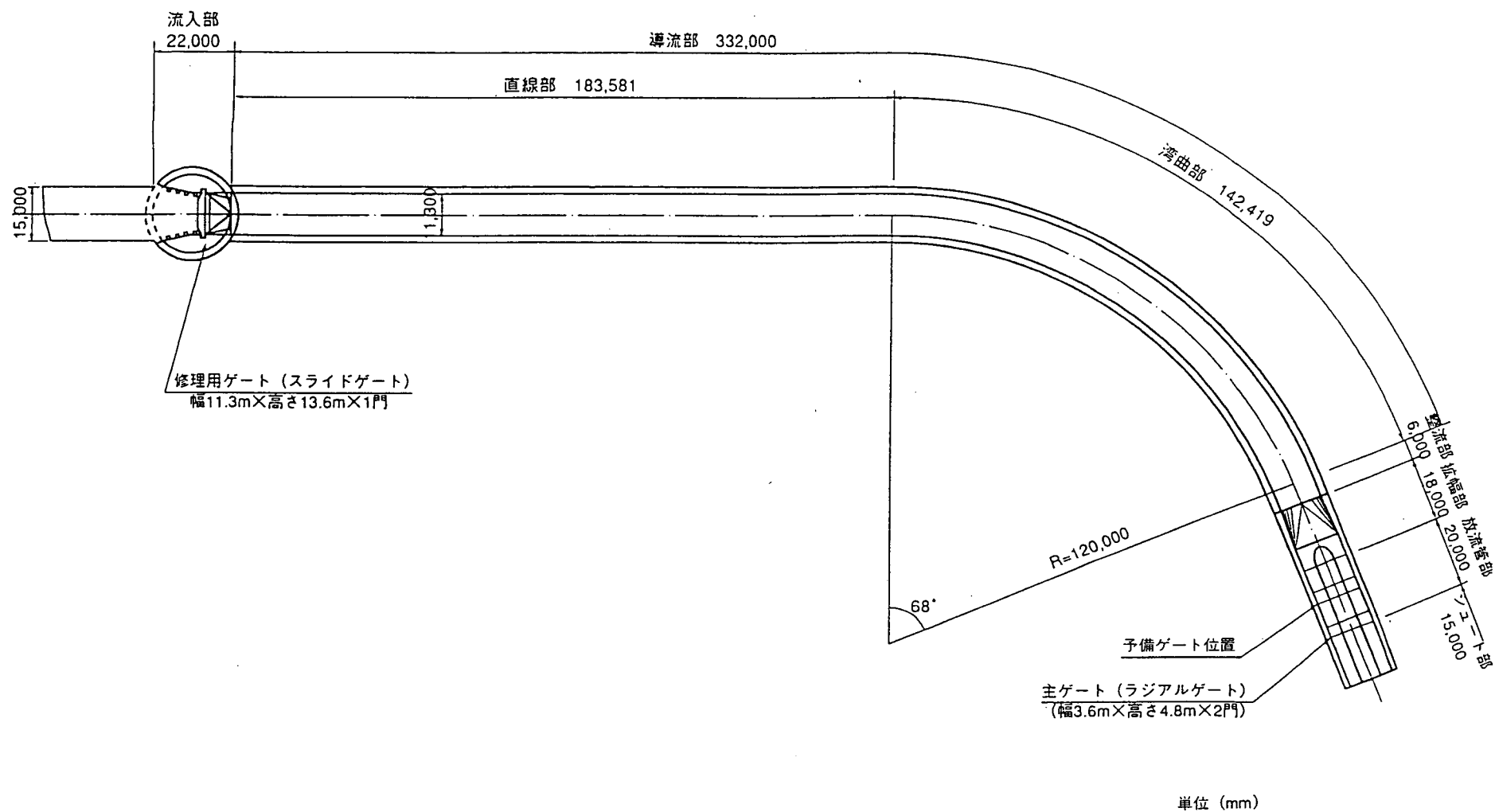
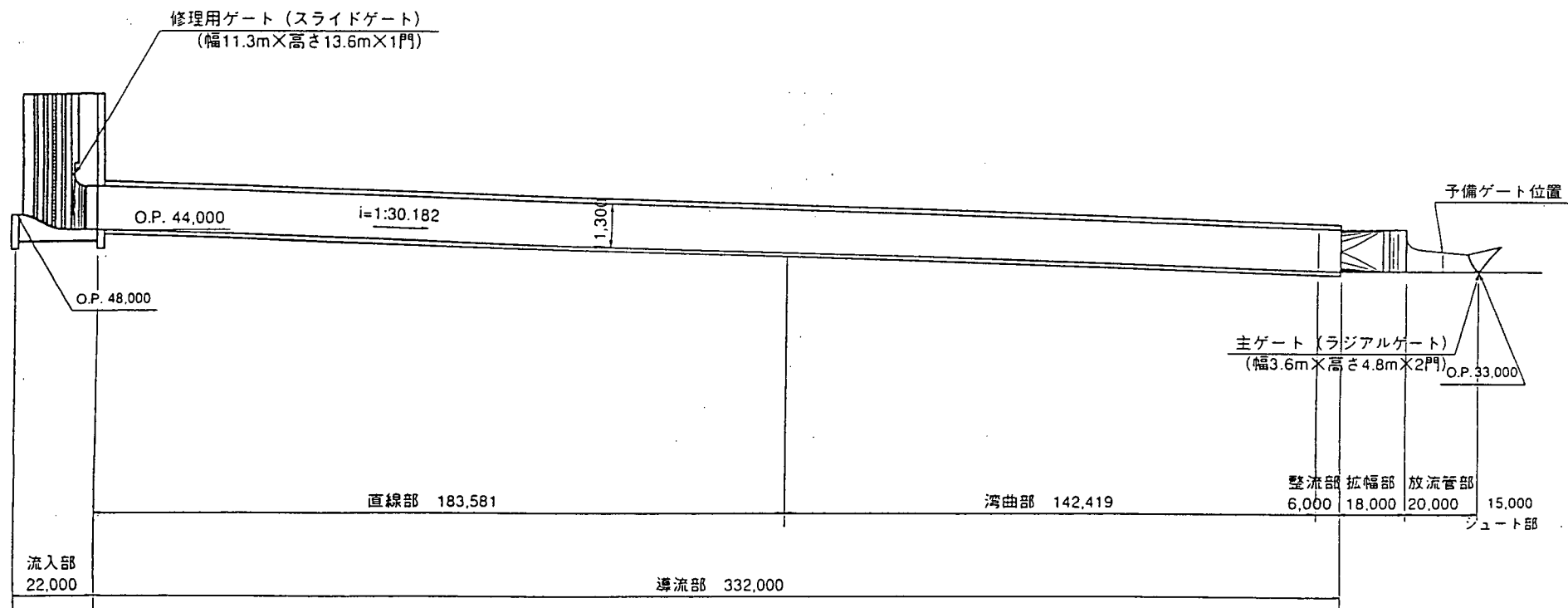
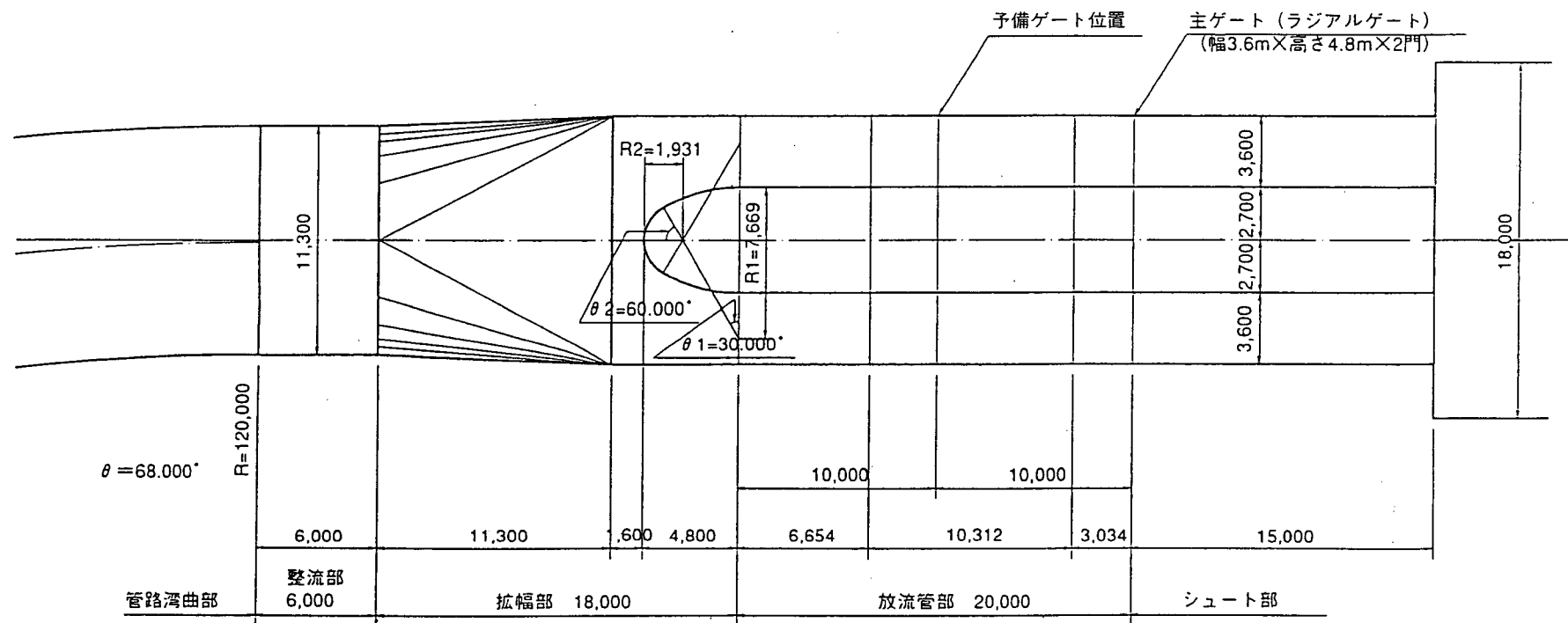


図-1.10 放流設備平面図 (最終案)



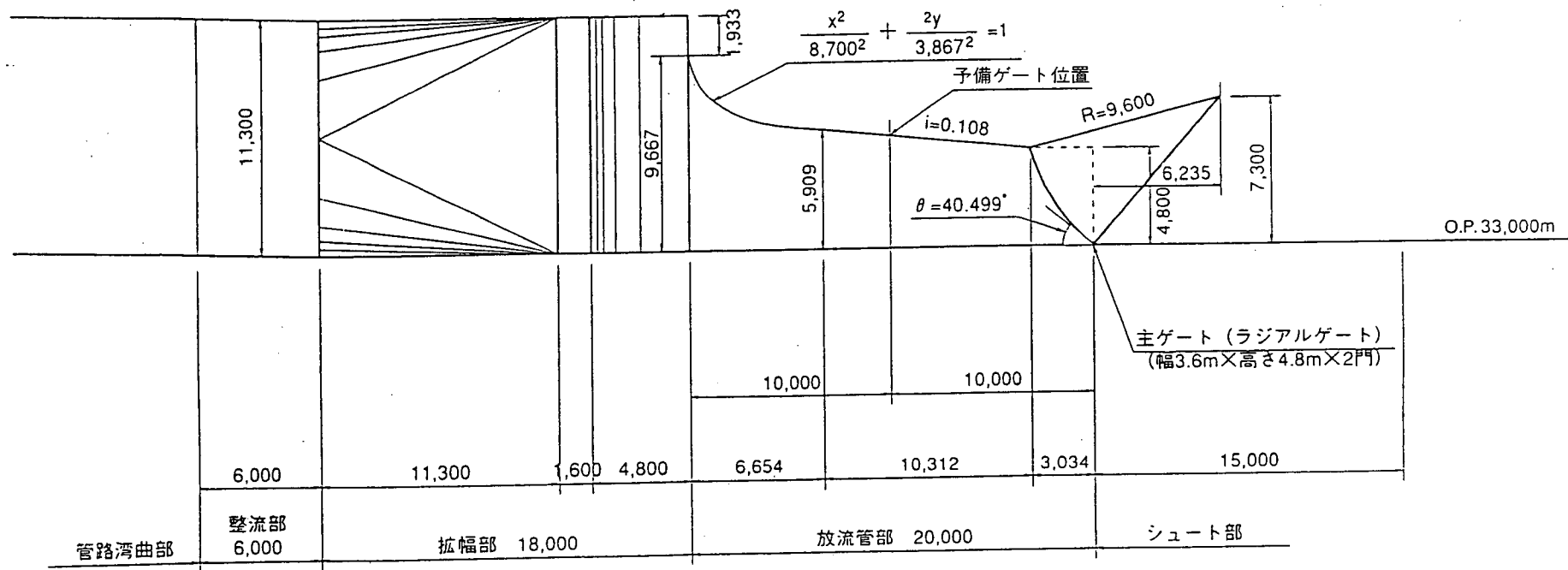
単位 (mm)

図-1.11 放流設備縦断図 (最終案)



単位 (mm)

図-1.12 放流管部平面図 (最終案)



単位 (mm)

図-1.13 放流管部縦断図 (最終案)

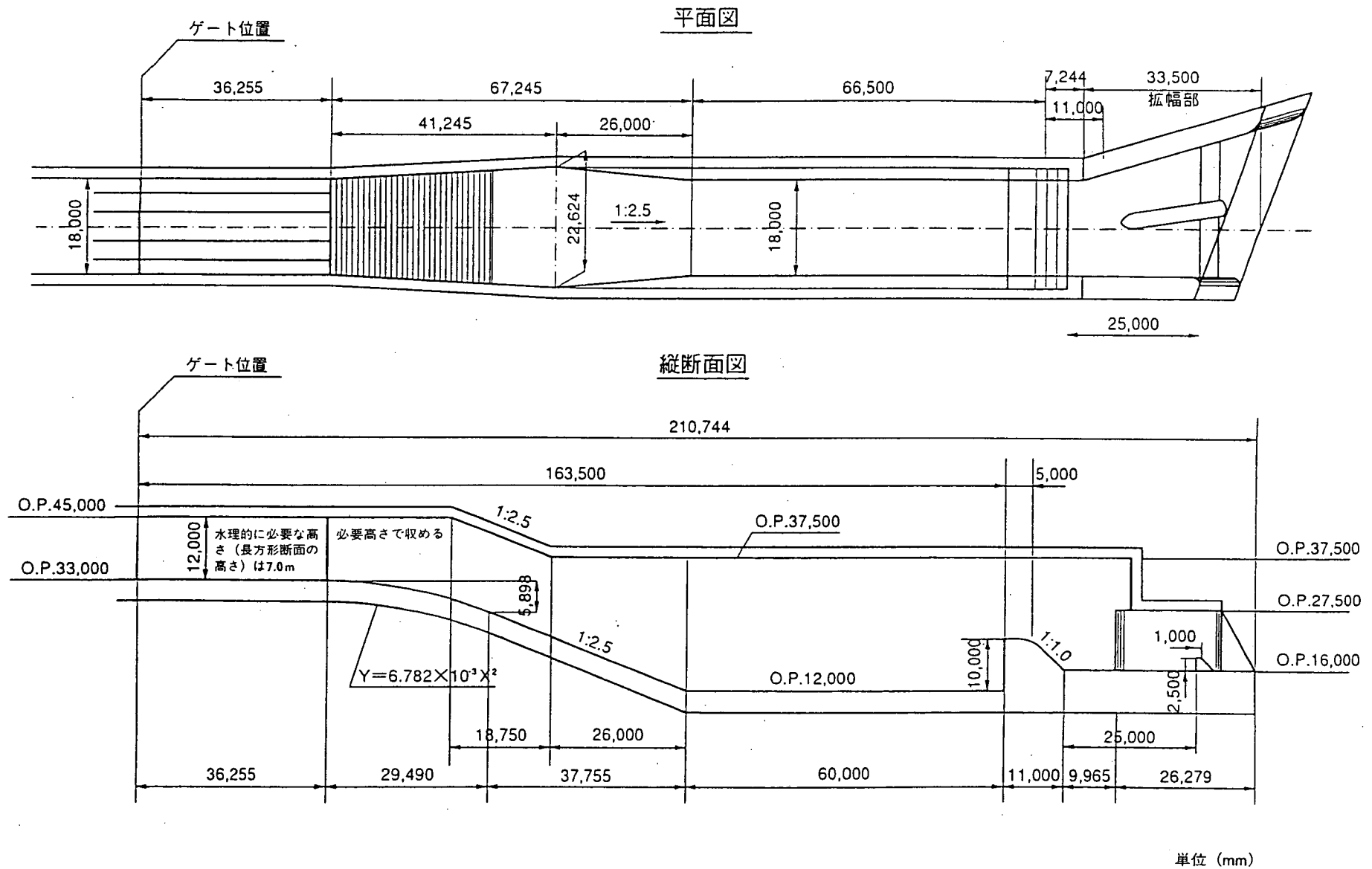


図-1.14 減勢工部形状図 (最終案)

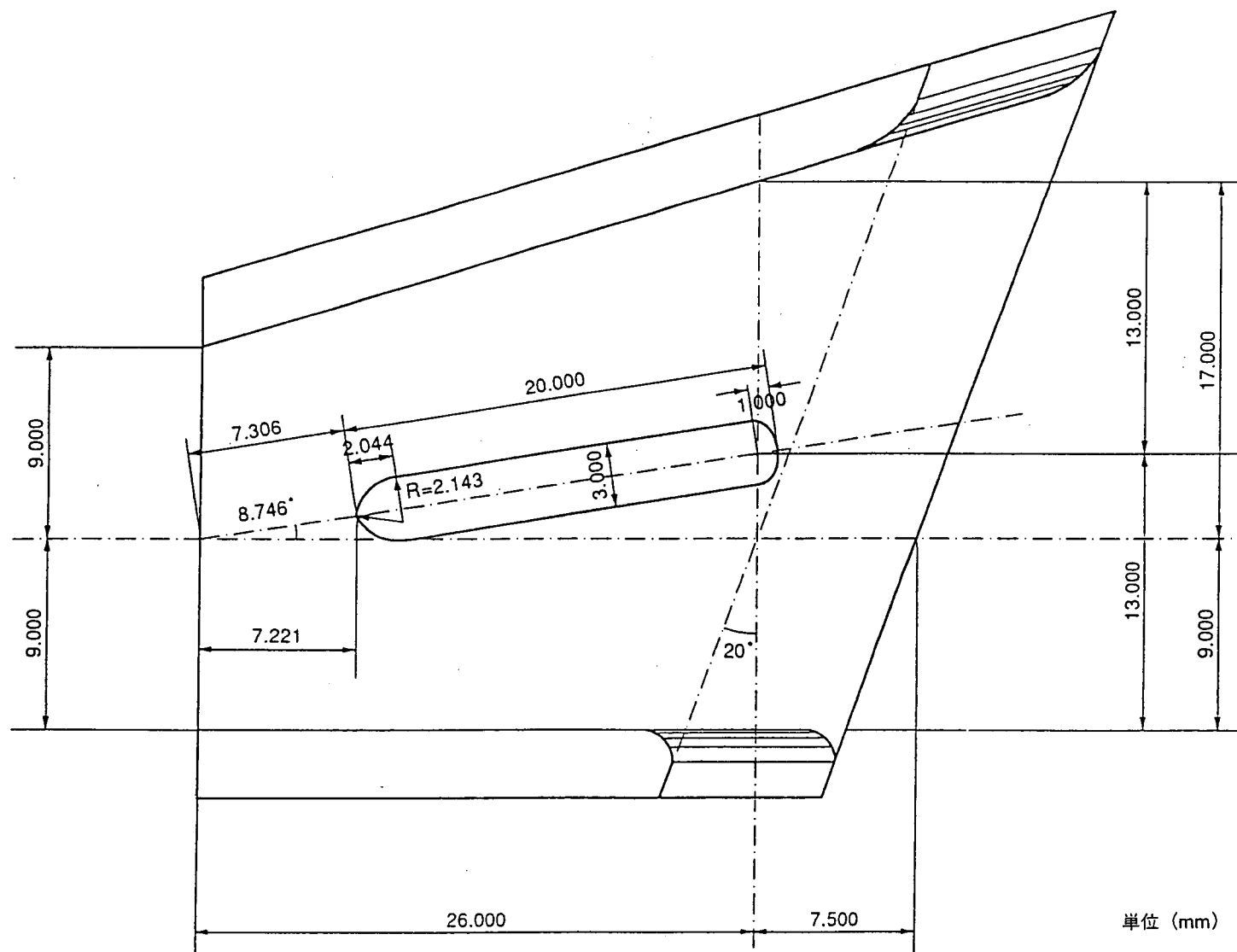
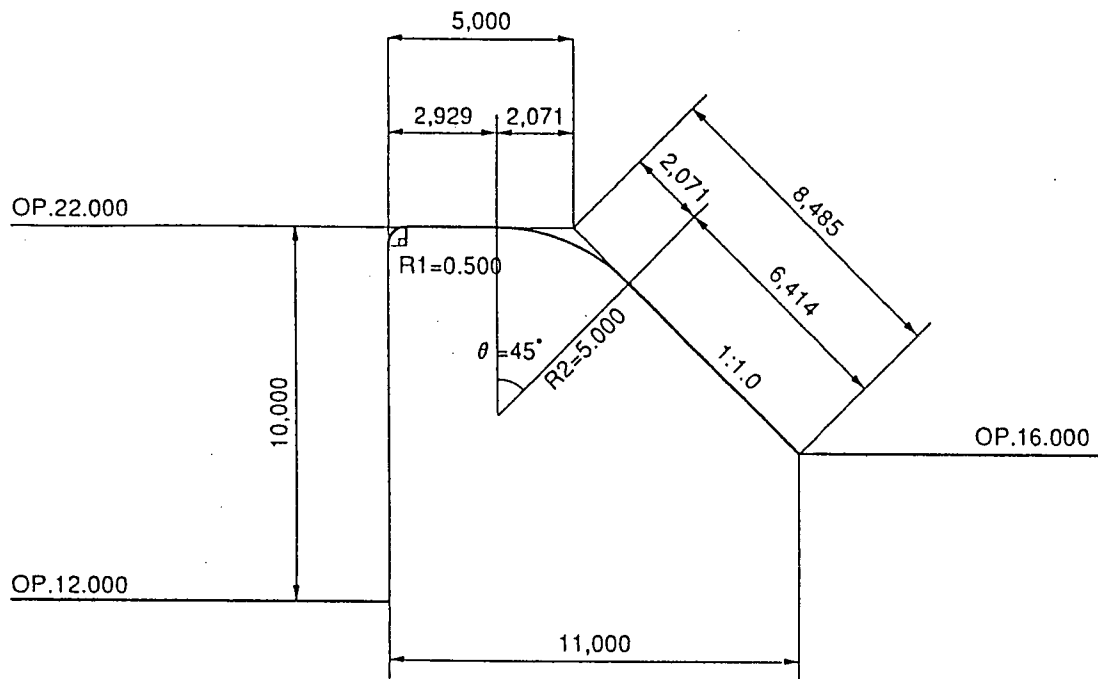
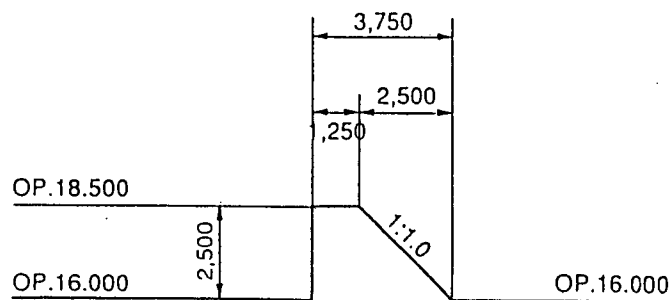


図-1.15 合流部詳細図 (最終案)

副ダム詳細図



シル詳細図



單位 (mm)

図-1.16 副ダムおよびシル詳細図（最終案）

第2章 検討概要

天ヶ瀬ダムの減勢工には、前述のように水平水叩き上に跳水を発生させる「水平水叩き式減勢工」が用いられている。跳水は、流水が射流から常流に変化する急変現象であるが、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。このように跳水時には音が発生するが、この発生メカニズム、流量等の水理学的条件と発生音との関係等についての系統だった検討は行われていないのが現状である。

一方、跳水に限らず、ダム放流時には人間には聞こえにくい超低周波成分が卓越した音が発生することが現地観測結果等から知られている。この超低周波が大きい場合や長期に渡る場合に周辺の建物や建物内の建具を振動させる等の問題を起こす場合がある。

天ヶ瀬ダムのトンネル式洪水吐きは、洪水調節後の琵琶湖の後期放流を安全に流下させることを目的の一つとしている（第一章参照）。この放流は、長期に渡ることが予想されるため、発生する超低周波の音圧レベルが大きい場合には、ダム周辺の民家等に悪影響を及ぼす可能性がある。また、景観等環境上の配慮から減勢工を含む洪水吐き全体を地下構造物とする計画となっており、単に跳水時の発生音のみならず、減勢工内における共鳴現象についても検討が必要である。

本報告は、このような状況を受けて実施したトンネル式洪水吐き減勢工における発生音についての検討結果をとりまとめたものである。なお、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、個々のダムにおいてそれぞれの地形・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る。その際には、重力の影響が卓越することからフルードの相似則による模型実験値の原型実験値への換算がなされる。

本検討も模型実験を用いて発生音の再現を試みているが、音の発生メカニズムが明らかでないため、現時点では適用可能な相似則も当然明らかでない。そこで、幾何学的に相似で大きさの異なる4種類の模型を用いた実験を行い、跳水時の発生音の基本的な性質および地下空間内での伝播特性を検討するとともに、それら支配要因を分析し、模型実験結果を実際の現象に換算するための相似則についての検討を併せて行っている。また、これらの実験は、流量条件については流れの相似則としてフルード相似を適用することを前提として行っている。

本報告で述べる検討結果は大きく以下の項目に分けられる。

1) 跳水時の発生音特性の把握

通常の上方が開放された減勢工において、跳水時に発生する音の周波数特性、音圧レベルおよび水理量との関係について、模型実験を用いて検討を行った。

2) トンネル内の伝播特性の把握

跳水がトンネル内で生じた場合の発生音のトンネル内での伝播特性について模型実験による検討を行った。

3) 発生音の予測手法の検討

上記の検討結果を受けて、水理模型実験結果から実際の構造物において発生する音を予測する手法について検討した。また、他の既存ダムにおいて放流時における発生音の現地観測を行い、予測手法の検証を

行った。

4) 天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備減勢工における発生音の推定

天ヶ瀬ダムに新設されるトンネル式放流設備の減勢工において発生する音の周波数特性および音圧レベルの推定を行った。

第3章 跳水時発生音の特性

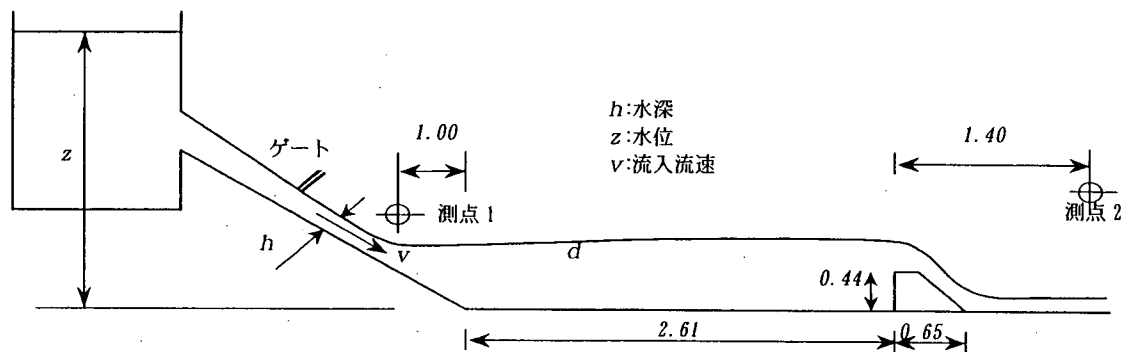
3.1 目的

トンネル内での跳水時発生音について考える前に、まず、通常の上方が開放された減勢工において跳水時に発生する音について、音源位置、周波数特性、音圧レベルおよび水量とこれらの関係を把握することを目的として水理模型実験による検討を行った。

3.2 実験模型

実験を行った模型概要を図-3.1に示した。模型は、減勢工部分のみの取り出した抽出模型とし、幾何学的に相似な4種類の大きさとしたが、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とした。各模型の詳細図を図-3.2~4に示した。

模型縮尺は、実機の1/46、1/23、1/15.3および1/11.5の4種類とした。(便宜上、この2番目の縮尺模型を標準(1倍)とし、他を1/2倍、1.5倍および2倍模型と呼ぶ。)



注)1/1 倍模型の寸法を示した。(単位: m)

図-3.1 実験模型の概要

3.3 放流条件

放流条件は、表-3.1に示したとおり9種類を基本とし、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。跳水の形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種の跳水形態を含む範囲となっている。減勢工の対象流量700m³/s流下時の流入フルード数はほぼ8程度であり、表6-1中の1-7,2-7,3-7,4-7に相当する。なお、水理条件、模型寸法等実験条件は全て模型値で記している。

なお、表-3.1に示した放流条件は流入流速測定時のものであり、音の測定は同時に行っているわけではない。したがって、発生音測定時の放流条件は表-3.1とは若干は異なっているが、表-3.1との差はわずかであり、種々の検討に際しては同一放流条件として取り扱っている。

Technical drawing of a sewerage system layout, showing a cross-section and plan view. The drawing includes dimensions and labels for various components.

Dimensions (Plan View):

- Pressure Water Tank (圧力水槽): 2.634
- Manhole (排水管): 100φ
- Manhole Structure: 1.800 (height), 0.743 (depth)
- Manhole Structure: 1.856 (height)
- Manhole Structure: 3.393 (length)
- Manhole Structure: 2.609 (height)
- Manhole Structure: 7.435 (height)
- Manhole Structure: 1.910 (height)
- Manhole Structure: 2.000 (height)
- Manhole Structure: 2.120 (height)
- Manhole Structure: 17.620 (height)
- Manhole Structure: 15.293 (height)

Dimensions (Cross-section):

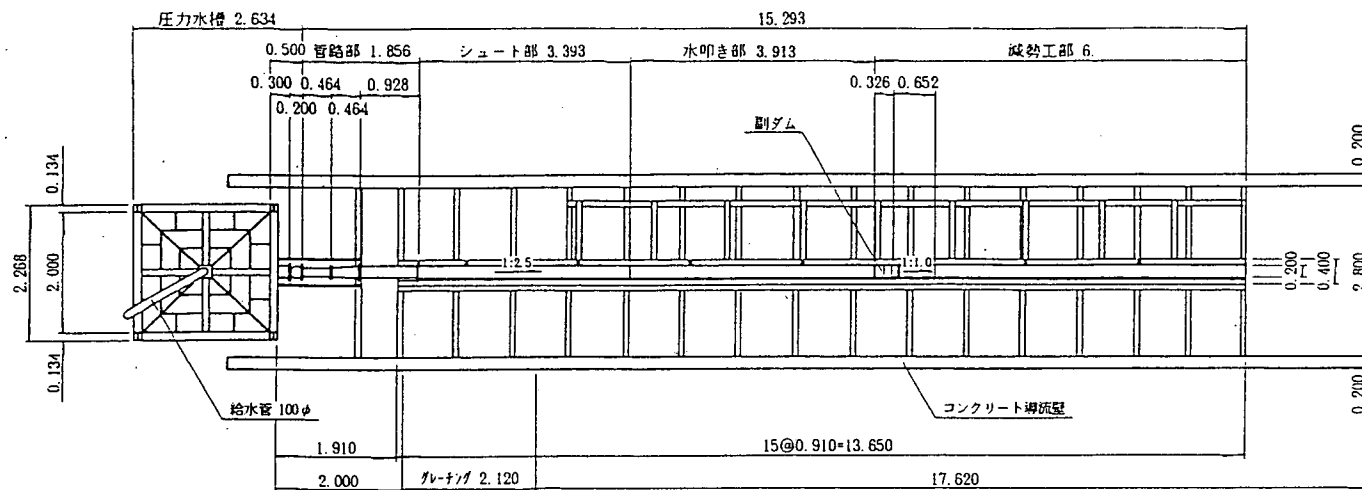
- Manhole Structure: 0.500 (width)
- Manhole Structure: 0.300 (width)
- Manhole Structure: 0.464 (width)
- Manhole Structure: 0.928 (width)
- Manhole Structure: 0.200 (width)
- Manhole Structure: 0.464 (width)
- Manhole Structure: 0.217 (width)
- Manhole Structure: 0.435 (width)
- Manhole Structure: 0.435 (width)
- Manhole Structure: 0.800 (width)
- Manhole Structure: 1.400 (width)
- Manhole Structure: 1.600 (width)

Labels:

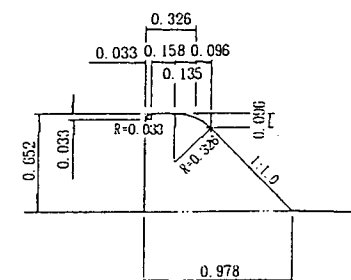
- 吸水口 0.2×0.15 (Inlet)
- 副ダム (Sub Dam)
- 暗渠音用配管 200φ (200φ Sound-attenuating Sewer Pipe)
- コンクリート製壁 (Concrete Wall)

(單位: m)

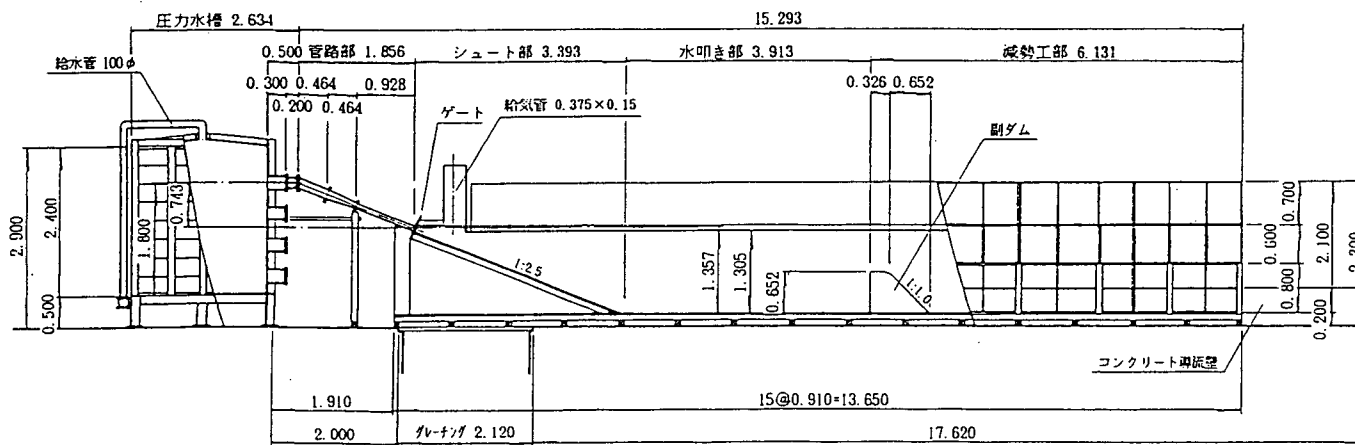
図-3.2 実験模型（1倍模型）



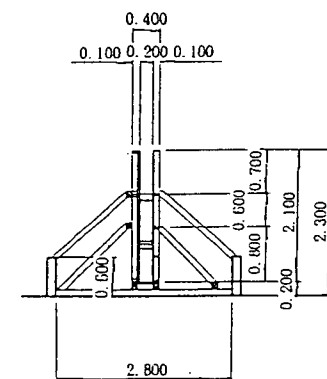
【平面図】



【副ダム形状図】



【縦断面図】



【横断面図】

(単位: m)

図-3.3 実験模型 (1.5 倍模型)

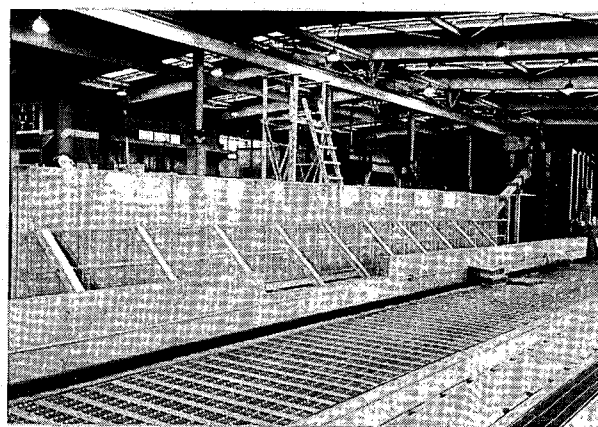
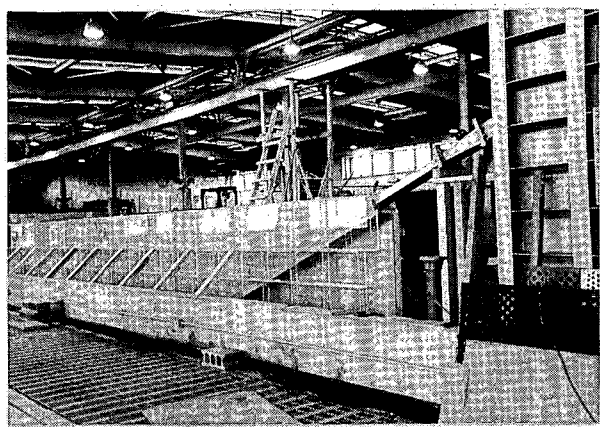


写真-3.1 模型完成状況（1倍模型）

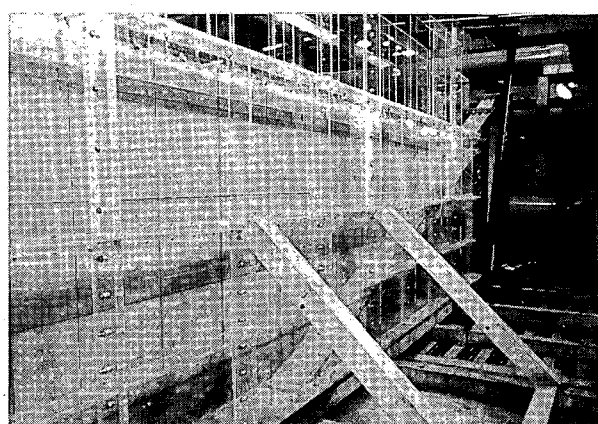
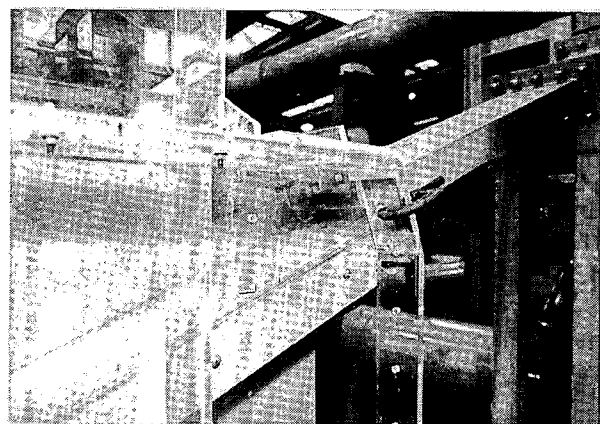


写真-3.2 模型完成状況（1.5倍模型）

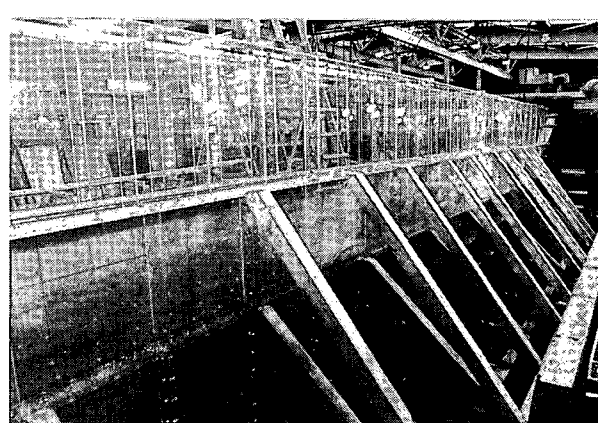
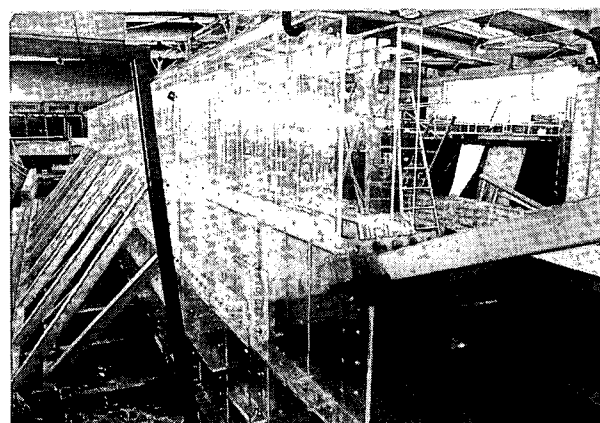


写真-3.3 模型完成状況（2倍模型）

表-3.1 実験条件一覧

模型 縮尺 $1/n$	天井	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	フルード数 Fr	
$1/2$	なし	1.50	1.29	9.7	3.76	10.6	1-1-a
		1.25	1.15	8.1	3.52	10.5	1-2-a
		1.00	1.03	6.2	3.01	9.5	1-3-a
		1.50	1.57	13.3	4.24	10.8	1-4-a
		1.25	1.48	11.0	3.72	9.8	1-5-a
		1.00	1.30	8.3	3.19	8.9	1-6-a
		1.50	2.33	20.1	4.31	9.0	1-7-a
		1.25	2.14	15.7	3.67	8.0	1-8-a
		1.00	1.87	11.9	3.18	7.4	1-9-a
$1/1$	なし	3.00	2.44	28.0	5.74	11.7	2-1-a
		2.50	2.31	23.5	5.09	10.7	2-2-a
		2.00	2.00	18.2	4.55	10.3	2-3-a
		3.00	3.44	37.8	5.49	9.5	2-4-a
		2.50	3.03	31.4	5.18	9.5	2-5-a
		2.00	2.53	23.8	4.70	9.4	2-6-a
		3.00	4.76	54.6	5.74	8.4	2-7-a
		2.50	4.36	45.0	5.16	7.9	2-8-a
		2.00	3.65	33.8	4.63	7.7	2-9-a
$3/2$	なし	4.50	3.39	51.5	7.60	13.2	3-1-a
		3.75	3.22	43.3	6.72	12.0	3-2-a
		3.00	2.86	33.5	5.86	11.1	3-3-a
		4.50	4.89	69.4	7.10	10.3	3-4-a
		3.75	4.36	57.6	6.61	10.1	3-5-a
		3.00	3.79	43.8	5.78	9.5	3-6-a
		4.50	6.84	100.4	7.34	9.0	3-7-a
		3.75	6.30	82.6	6.56	8.3	3-8-a
		3.00	5.63	62.1	5.52	7.4	3-9-a
$2/1$	なし	6.00	4.68	78.8	8.42	12.4	4-1-a
		5.00	4.12	66.2	8.03	12.6	4-2-a
		4.00	3.68	50.6	6.88	11.4	4-3-a
		6.00	6.00	107.4	8.95	11.7	4-4-a
		5.00	5.58	89.4	8.01	10.8	4-5-a
		4.00	4.85	67.2	6.93	10.0	4-6-a
		6.00	9.76	156	7.99	8.2	4-7-a
		5.00	9.09	128.4	7.06	7.5	4-8-a
		4.00	7.48	94.5	6.32	7.4	4-9-a

3.4 測定方法

3.4.1 音の測定

(1) 測定位置

測定位置は、図-3.1に示すように、音源位置と想定される跳水始端部直上の測点1（1/2倍模型は除く。）および副ダム下流の測点2である。また、跳水時発生音の音

源位置を特定することを目的として、1倍模型、実験No.2-8の流量条件下で、水面直上において跳水始端部付近から副ダム間で連続的に測定を行った。

(2) 測定機器

測定は、1～1000Hzの間で歪のない測定が可能な低周波音レベル計を用いて行った。記録したデータはサンプルレート2000HzでAD変換し、音圧実効値を求めるとともに分解能を約4HzとしてFFT解析を行い、パワースペクトルを求めた。また、FFT解析は1回あたり512個のデータを用いて行い、さらにこれを1測定音あたり240回行って平均を求めている。FFT解析に用いた諸量は以下のとおりである。

解析最大周波数	: $f_{\max}$	=1000 Hz
サンプルレート	: f_s	=2000 Hz
分解能	: f	=3.906 Hz
FFT 1回あたりデータ数	: N	=512 個
FFT 1回あたりデータ記録長	: T	=0.256s
総データ長	: T_t	=61.44s (= $T \times M$)
FFT総数（平均回数）	: M	=240 回

また、同様の放流量条件をバイパス水路で流し、ポンプ運転音等の暗騒音測定を行った。測定した暗騒音も発生音と同様にFFT解析を行い、周波数毎に発生音から暗騒音を差し引いて補正した。

3.4.2 水理量の測定

(1) 流入流速

跳水始端部直上流で、水深方向に5点ないし6点について、ピトー管を用いて流速を測定した。ピトー管は斜面に平行に設置し、斜面方向成分のみを測定した。

(2) 流量

電磁流量計の値を直読した。

(3) 水位

圧力水槽にピエゾ管を接続し、水位を1mm目盛りスケールで読み取った。

(4) 流速変動

1.5倍模型の1流量条件についてのみ跳水始端部における流速変動を測定した。測定は2方向成分の測定が可能な電磁流速計を用いて行い、鉛直および水平成分の流速変動を測定した。測定データはデー

タレコーダーに記録し、サンプルレート2000HzでAD変換し、FFT解析を行い、パワースペクトルを求めた。

(5) 流況

目視によるスケッチ、写真撮影およびビデオ撮影を行った。

3.5 水理条件の測定結果

3.5.1 流入流速

跳水現象を支配する水理条件は、下流水深を一定とすれば跳水始端部直上流のフルード数すなわち水脈厚さと流速と考えられる。一方、実験で制御可能なパラメーターは、流量およびゲート開度である。

ゲートを通過した水脈は、斜面を流下するにつれて加速され、水脈厚は徐々に小さくなるとともに、水面から空気混入を生じる。今回の縮尺模型は、減勢工形状は相似としているものの、実験設備の制約からゲートと跳水始端部間の距離は相似となっていないため、単純にゲート開度を縮尺比にしても水理条件は相似とはならない。したがって、流入水脈厚さおよび流速が相似となるようにゲート開度を適宜調節してやる必要がある。

そのためには、流入水脈厚あるいは流速を直接測定することが必要となるが、前述のとおり、水脈には水面から空気混入が生じており、正確な測定は困難である。したがって、本実験では、跳水始端部直上流の流速をピトー管で測定し、これを水理条件の基本量として用いることとし、水脈厚はこの流速の実測値と流量計から読み取った流量から計算することとした。

付図-3.1~12に流入流速の測定結果を示した。得られた流速分布は、各ケースともほぼ対数分布となっており、次式で表すことができる。

$$V(y) = a \log(\beta y) \quad (3-1)$$

ここに

V : 流速

y : 水深

a, β : 定数

これを、次式に示すように水深方向に積分して、単位幅流量 Q/B に一致するように h を定めることとした。

$$\int_0^h V(y) dy = Q/B \quad (3-2)$$

なお、底部は図-3.5に示すように直線分布とし、 $y = 1.0\text{mm}$ で(3-1)式と接続させた。また、単位幅流量を求めた水脈厚さで除して平均流速を求めた。得られた流入水脈厚および平均流速を表-3.1に示している。

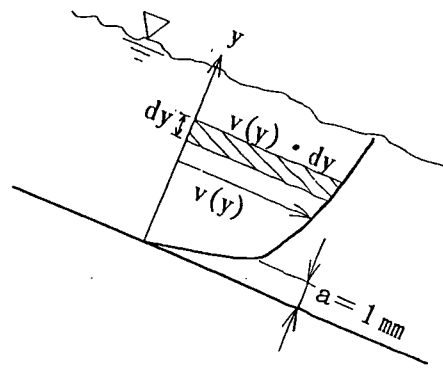


図-3.5 流入水脈の流速分布

3.5.2 流況

流況を付図-3.13~24および写真-3-4~9に示した。跳水発生音に関係が深いと考えられる空気の入混状況について見ると、同一縮尺内では、流入エネルギーが大きいほど白濁域が大きくなる傾向が見られる。一方、水理条件をフルード相似としている各縮尺模型間で比較すると、縮尺が大きいほど白濁域が大きくなる傾向が見られるが、その差はわずかである。

跳水時の発生音については、この空気混入現象が大きな支配要因と考えられるので、模型実験において現象がどこまで再現できているのか、縮尺効果をどのように考慮すべきが課題となる。これについては第5章において原型値との比較により詳細な検討を行う。

3.6 跳水音の発生位置

跳水音の発生位置を特定するために、1倍模型（実験No.2-8-a）で跳水始端付近から副ダム直下の間で連続的に音圧レベルの測定を行った。測定結果および測定時の水面形を図-3.6に示す。音圧レベルは、跳水始端部で最大を示し、流下方向に向かって減衰する傾向を示した。

今、最大音圧レベルが記録された跳水始端部に幅方向に分布する線音源があると仮定すれば、その音源の音響出力と各測点における音圧レベルの関係は次式で与えられる。

$$L = L_w - 10 \log r - 8 \quad (3-3)$$

ここに L_w : 音源出力 [dB], L : 測定音圧レベル [dB], r : 音源と測点の距離 [m]

ここで、始端部直上の測定値 $L = 96\text{dB}$ および測定位置と音源の距離 $r = 0.6\text{m}$ を用いて音源の音響出力を求めると $L_w = 102\text{dB}$ となる。これを(3-3)に代入してやれば任意の測点の音圧レベルを計算することができる。すなわち、跳水始端部から距離 r 離れた測点における音圧レベルは次式で与えられる。

$$L = 94 - 10 \log r \quad (3-4)$$

式(3-4)から計算される音圧レベルを図-3.6 中に実線で示した。計算値は、ほぼ測定値と一致している。したがって、跳水音は始端部からの発生音が支配的であり、音源としてはほぼ線音源とみなせるものと考えられる。このことから、地下式減勢工から発生する音の系を、図-3.7に示すように単純化して取り扱うこととした。図中の観察音とは地下式減勢工の系全体としての発生音であり、実験上は測点2での測定音である。なお、図中の伝播および観測音の特性については次章で検討を行うものとし、

以下跳水始端部にあると考えられる音源についての検討を行う。

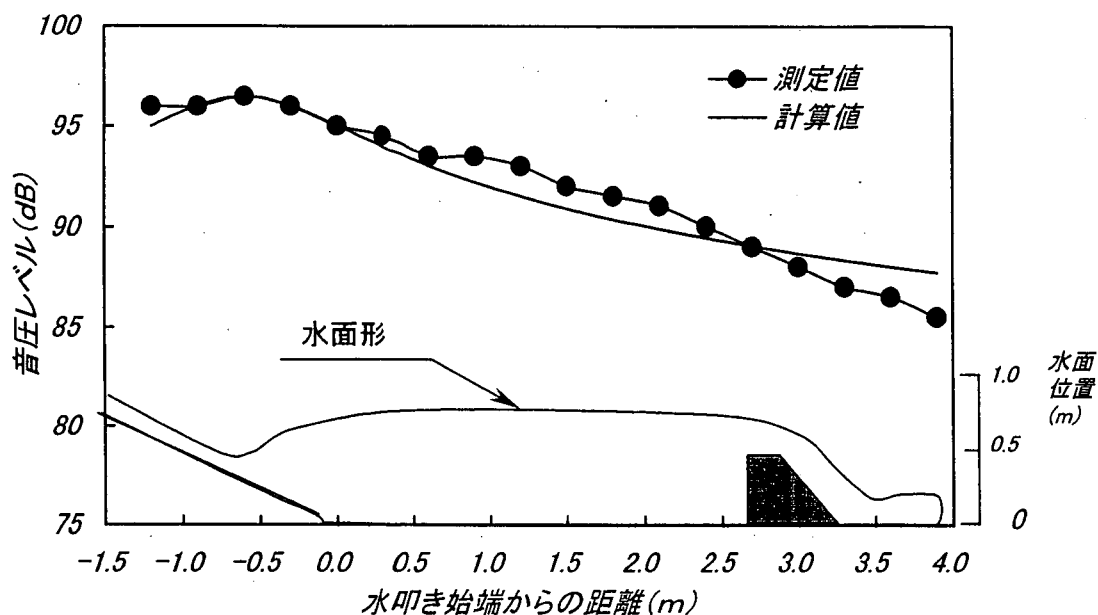


図-3.6 測定位置と水面形・音圧レベルの関係

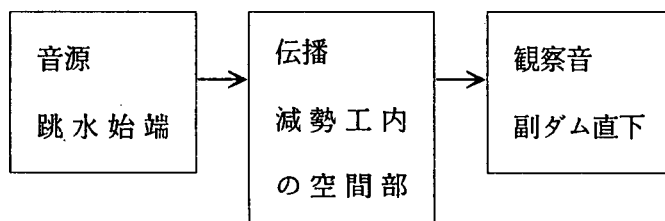


図-3.7 トンネル式減勢工の発生音の系

3.7 音源の特性

3.7.1 周波数特性

図-3.8～10に1倍、1.5倍および2倍模型の各9ケースにおける測点1での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無次元化したパワースペクトルを示した。両模型とも明確ではないものの低周波帯に卓越周波数も持ち、模型縮尺が大きい方がその卓越周波数は低くなっている。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つことがわかる。

付図-3-13～24および写真-3-4～9に各縮尺模型の流況を示した。これらからもわかるように、跳水には始端部から大量の空気が混入し、これによって生じた気泡は流れと浮力によって移動し、水面に達して消散する。跳水音はこの空気混入が大きく関係していると推定できる。始端部における気泡発生は図-3.11に示すように①高速の流入水脈に連行された空気による気柱の形成、②表面張力による気泡

の分離、によると考えられる。森ら²⁾は、鉄球の水面への落下実験から、気泡が水面から離脱する際には、Minnaert³⁾が理論的に求めた次式の気泡の膨張・収縮振動（0次モードの振動）の周波数： f の音が発生するとしている。

$$f = \frac{1}{\pi R} \sqrt{\frac{3 \gamma p_0}{\rho_w} - \frac{4 \sigma}{\rho_w R}} \quad (3-5)$$

ここに R ：気泡の直径、 γ ：比熱比、 p_0 ：大気圧、

ρ_w ：水の密度、 σ ：表面張力

これによって発生する音の周波数と気泡径の関係を図-3.12に示す。目視による観察によれば、気泡は、数mmから数cm程度であり、様々な径がランダムに存在する。このような気泡の自由振動による発生音は、数100Hz以上の高周波数帯の全域にわたって発生する雑音源とはなっているとは考えられるものの、図-3.5に見られる100Hz以下の低周波数帯の音源となるためには別の要因を考える必要がある。

跳水始端部における流況は、近似的に圧力勾配のある場への二次元噴流拡散現象と考えることができる。流入した高流速の水脈によるポテンシャルコアは減勢工の水平部付近まで伸び、周辺に乱れの大きい領域を形成する。図-3.13は、1.5倍模型において流入部付近および水平部始端付近でのコア近傍の流速変動を測定したものである。卓越した周波数は見られず、低周波数が大きいほぼ雑音と呼べる周波数分布となるが、流下方向成分は水平部始端付近では低周波成分は減少し、高周波成分が増加しているのに対して、水深方向成分は全周波数領域に渡って減少している。

空気噴流ではこのようなコア周辺の速度変動に起因して、流下方向の場所により異なる様々な周波数の音が発生することが知られている⁴⁾。水の場合も同様の現象が生じ得ると考えられるが、実際には空気連行が生じないように完全に水中で放流を行うと音はほとんど生じない。これは、水そのものに生じる音が小さいこと、空気との境界面での減衰が激しいことなどが考えられる。跳水には、写真-3.4～9に示すように始端部に気泡が非常に多い領域が存在し、この領域における流速変動が低周波音の発生、伝播に大きく寄与していると推測される。これは、前述の検討で、跳水の音が始端部の狭い領域から発生し、線音源とみなせたこととも符合する。

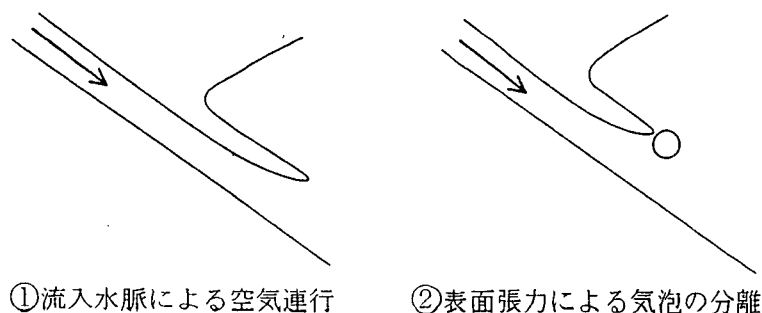


図-3.11 気泡混入の模式図

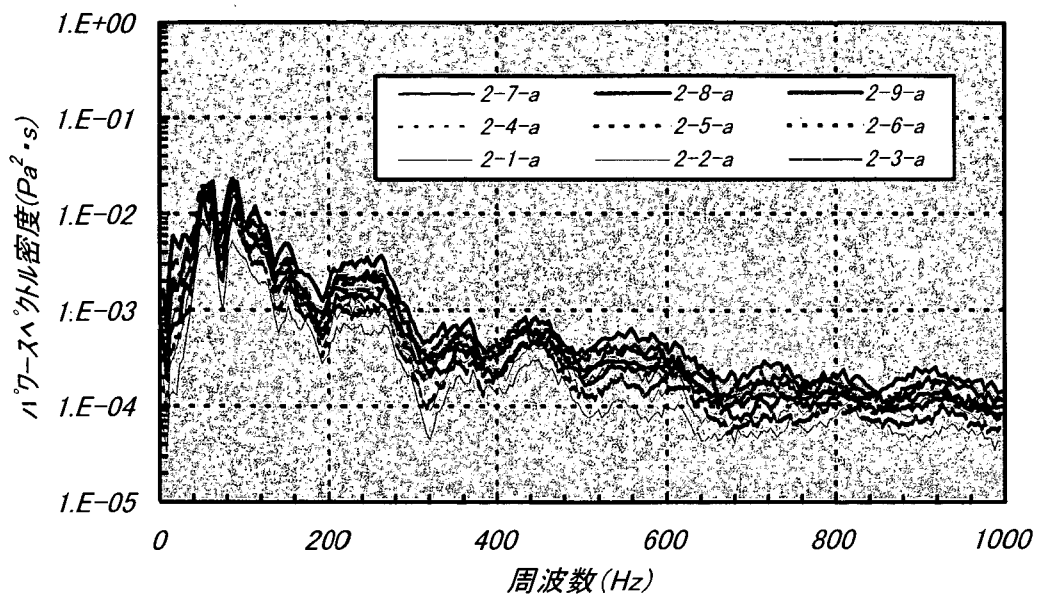


図-3.8a 1 倍模型音源（始端部）のパワースペクトル分布

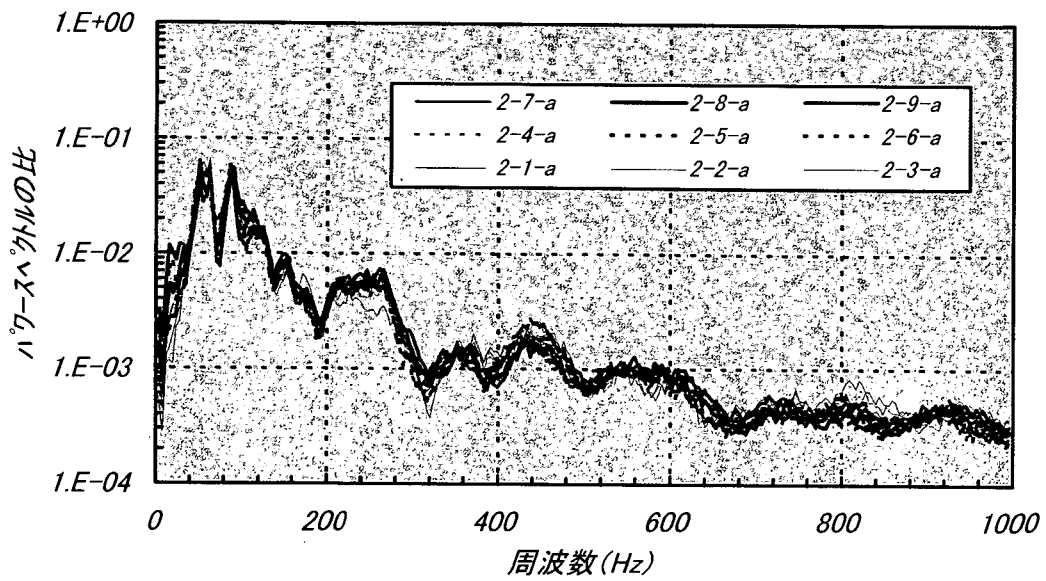


図-3.8b 1 倍模型音源（始端部）のパワースペクトル分布

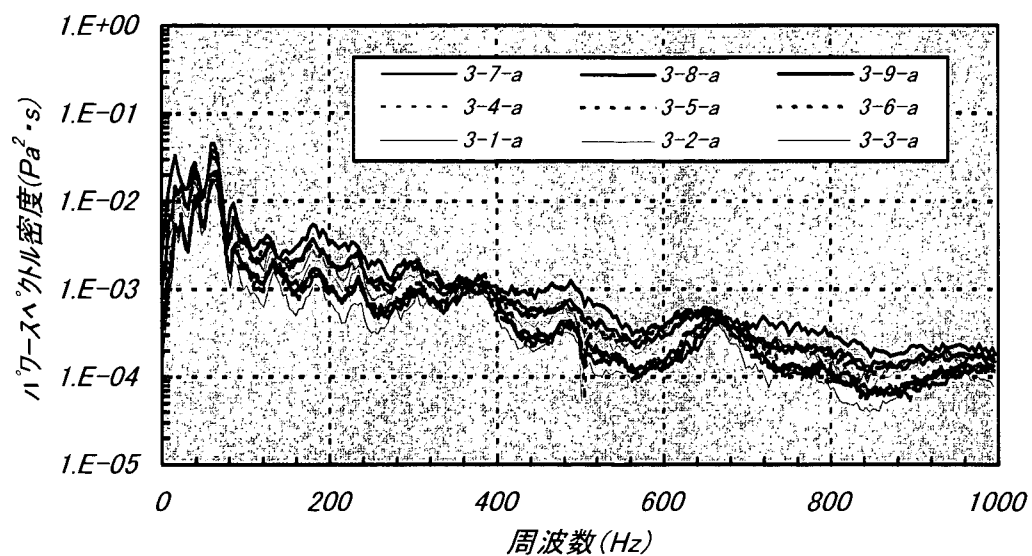


図-3.9a 1.5倍模型音源（始端部）のパワースペクトル分布

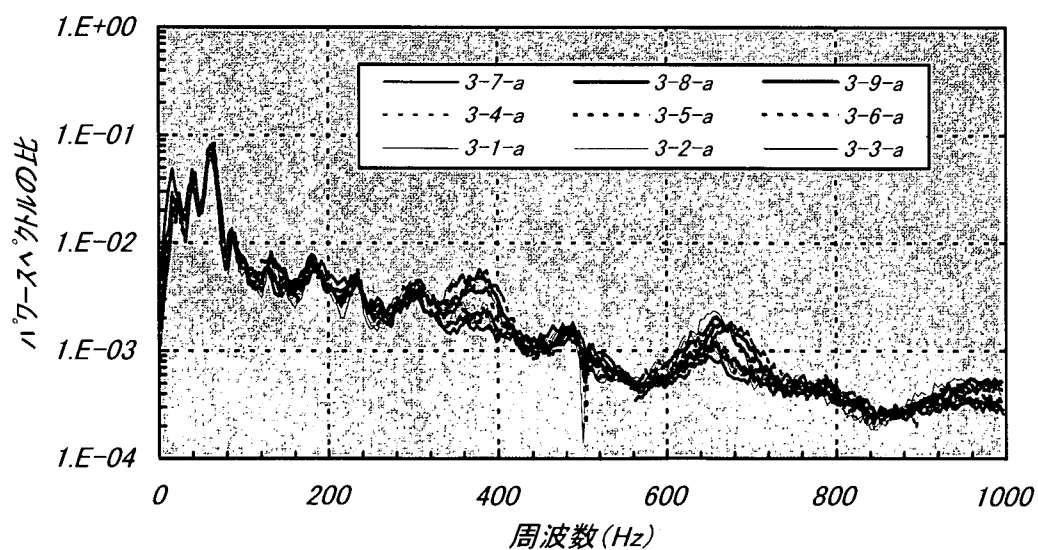


図-3.9b 1.5倍模型音源（始端部）のパワースペクトル分布

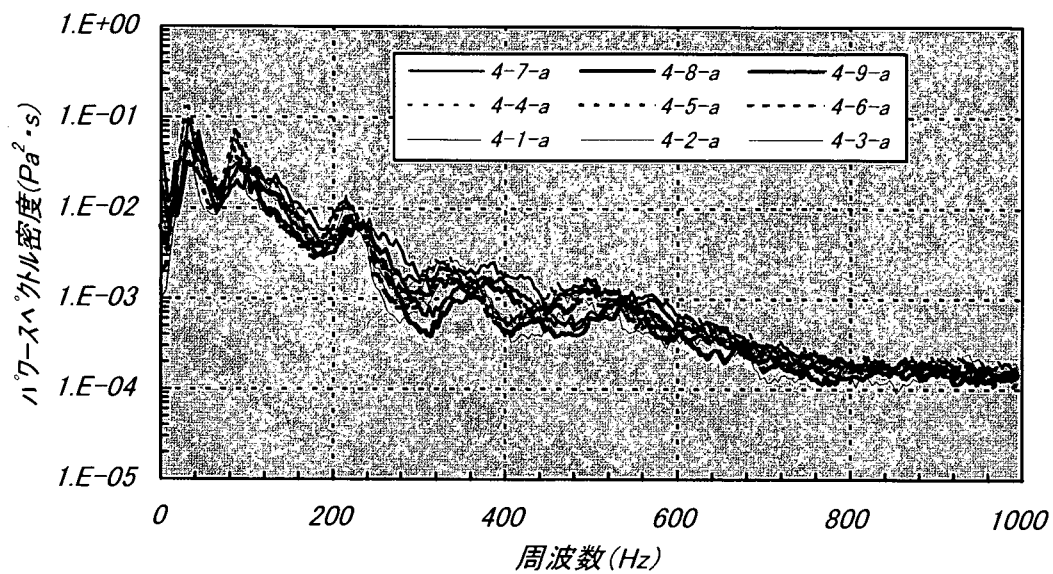


図-3.10a 2倍模型音源（始端部）のパワースペクトル分布

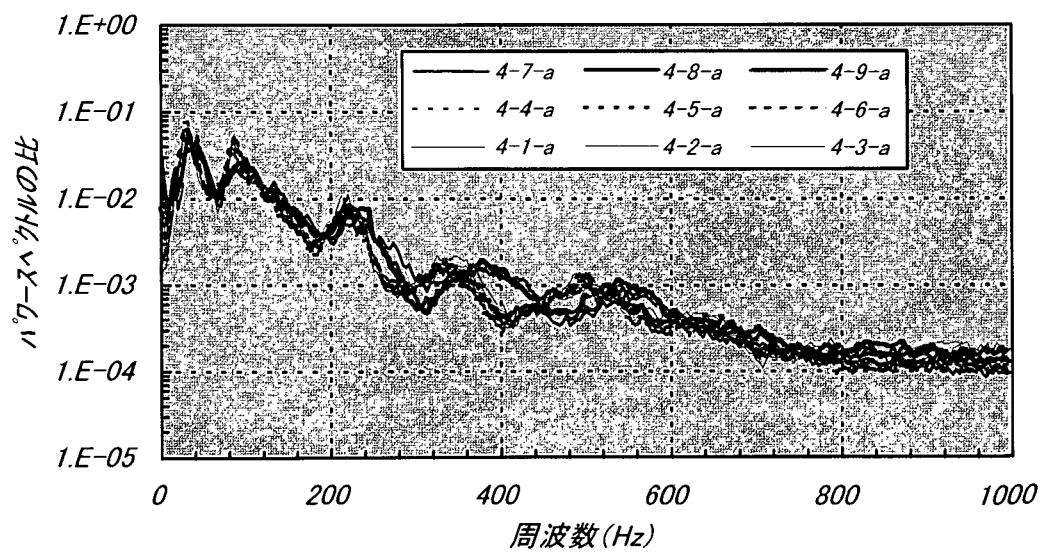
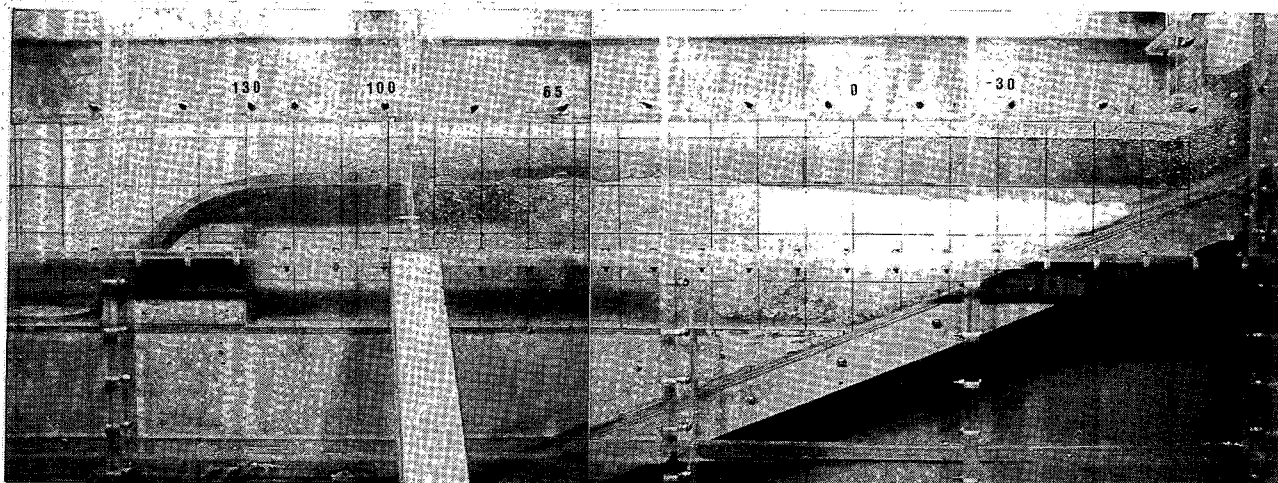
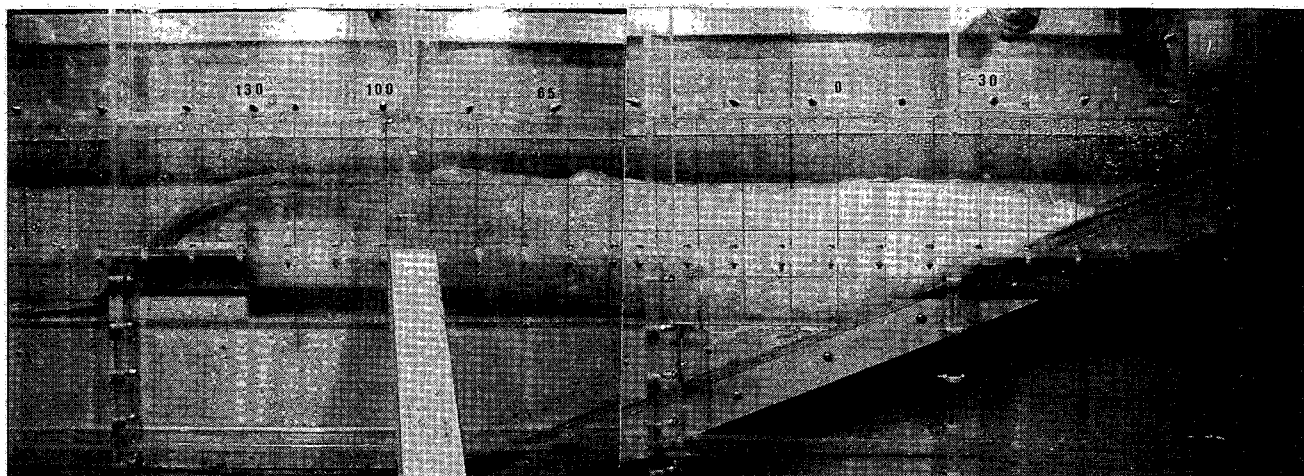


図-3.10b 2倍模型音源（始端部）のパワースペクトル分布



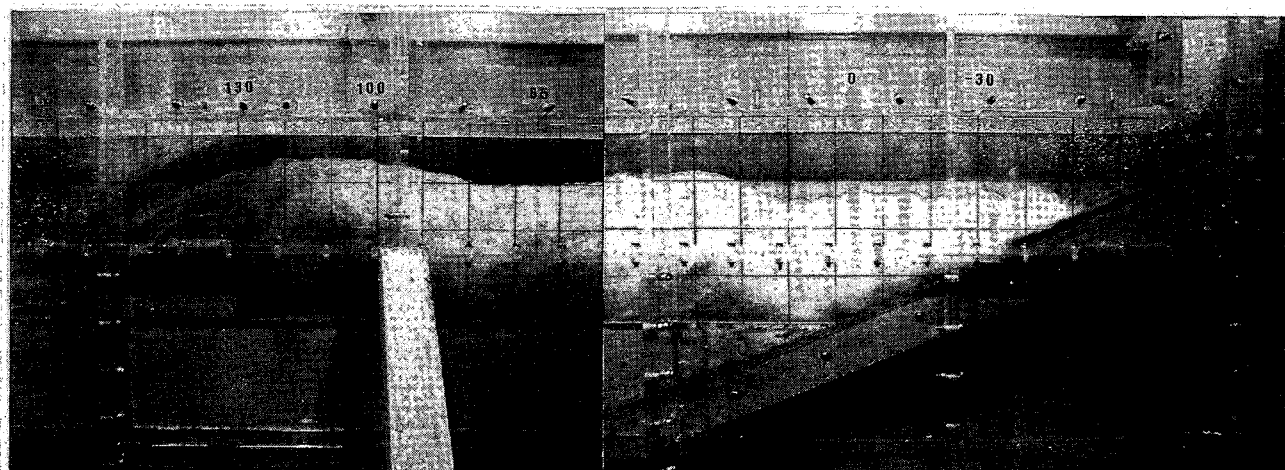
No 1-1-b 1/2 模型 $d = 21.8\text{cm}$ $D = 43.5\text{cm}$ $h_1 = 1.5\text{cm}$ $Z = 1.469\text{m}$ $Q = 9.70\text{ l/s}$

写真-3.4 1/2 模型副ダム原形状の流況 ($D = 43.5\text{cm}$, $h_1 = 1.5\text{cm}$, $Z = 1.5\text{m}$)



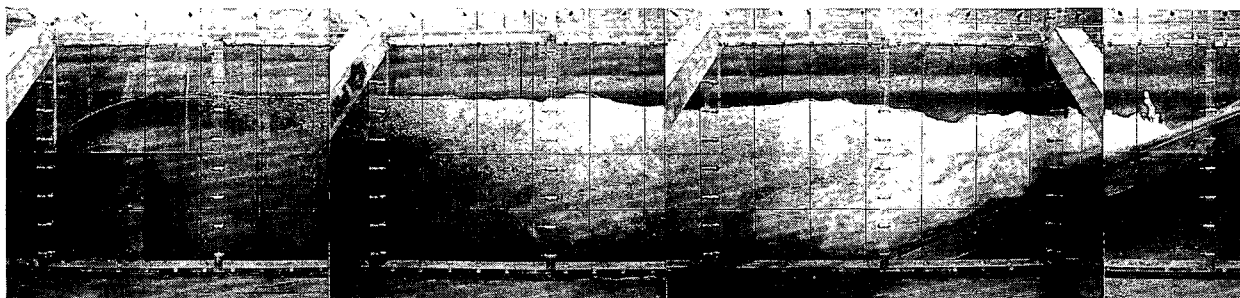
No 1-4-b 1/2 模型 $d = 21.8\text{cm}$ $D = 43.5\text{cm}$ $h_1 = 2\text{cm}$ $Z = 1.469\text{m}$ $Q = 13.26\text{ l/s}$

写真-3.5 1/2 模型副ダム原形状の流況 ($D = 43.5\text{cm}$, $h_1 = 2\text{cm}$, $Z = 1.5\text{m}$)



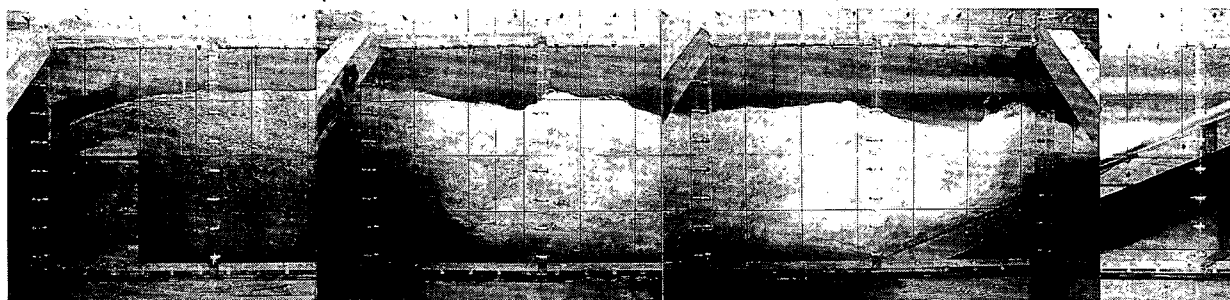
No 1-7-b 1/2 模型 $d = 21.8\text{cm}$ $D = 43.5\text{cm}$ $h_1 = 3\text{cm}$ $Z = 1.518\text{m}$ $Q = 20.08\text{ l/s}$

写真-3.6 1/2 模型副ダム原形状の流況 ($D = 43.5\text{cm}$, $h_1 = 3\text{cm}$, $Z = 1.5\text{m}$)



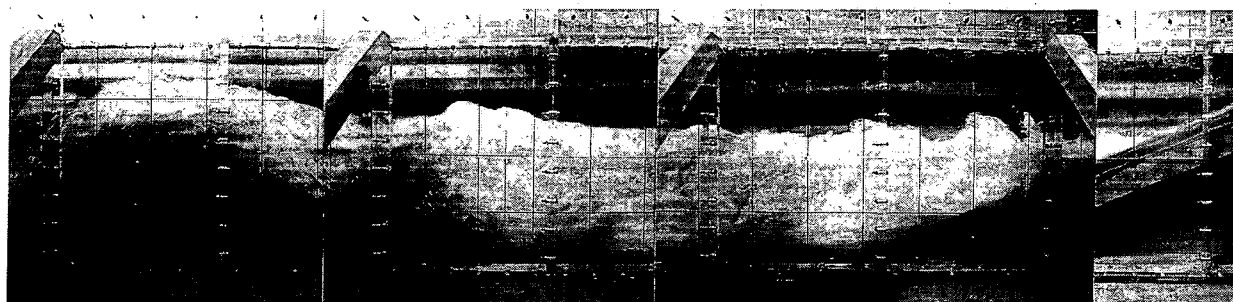
№ 2 - 1 - b 1/1 模型 $d = 43.5\text{cm}$ $D = 87\text{cm}$ $h_1 = 3\text{cm}$ $Z = 3.005\text{m}$ $Q = 28.04\text{ l/s}$

写真-3.7 1/1 模型副ダム原形状の流況 ($D = 87\text{cm}$, $h_1 = 3\text{cm}$, $Z = 3\text{m}$)



№ 2 - 4 - b 1/1 模型 $d = 43.5\text{cm}$ $D = 87\text{cm}$ $h_1 = 4\text{cm}$ $Z = 3.013\text{m}$ $Q = 37.80\text{ l/s}$

写真-3.8 1/1 模型副ダム原形状の流況 ($D = 87\text{cm}$, $h_1 = 4\text{cm}$, $Z = 3\text{m}$)



№ 2 - 7 - b 1/1 模型 $d = 43.5\text{cm}$ $D = 87\text{cm}$ $h_1 = 6\text{cm}$ $Z = 3.009\text{m}$ $Q = 54.64\text{ l/s}$

写真-3.9 1/1 模型副ダム原形状の流況 ($D = 87\text{cm}$, $h_1 = 6\text{cm}$, $Z = 3\text{m}$)

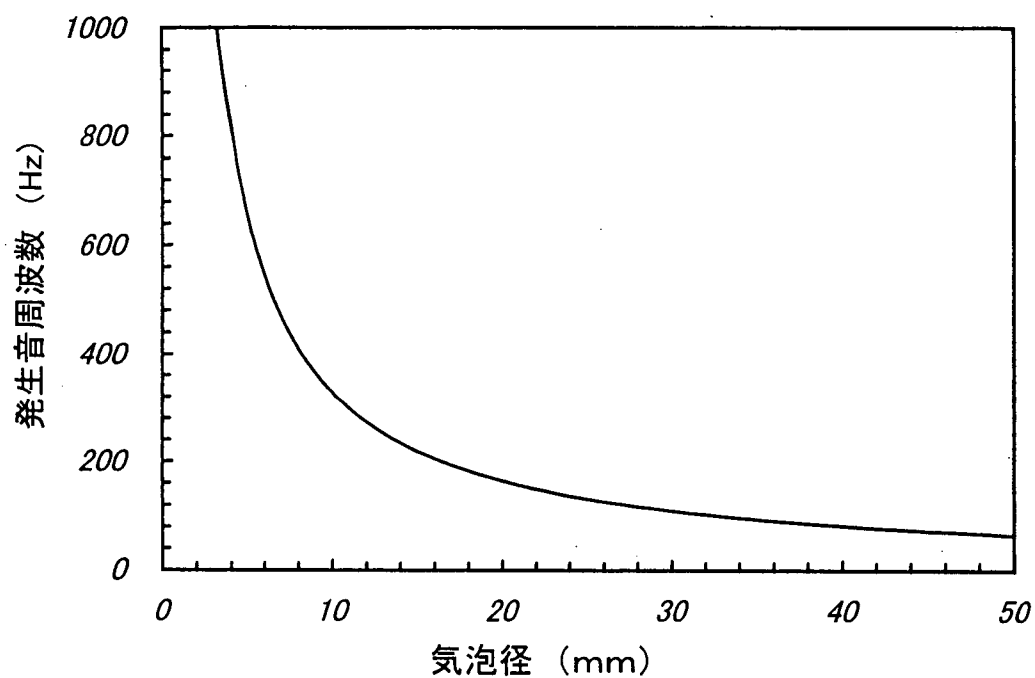


図-3.12 気泡の振動周波数

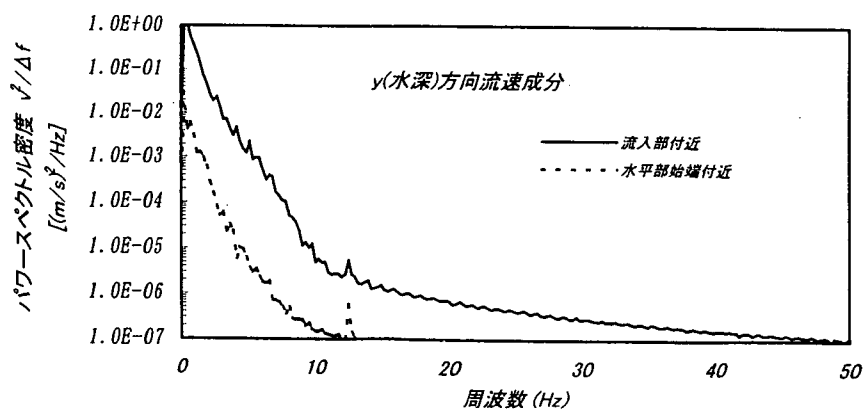
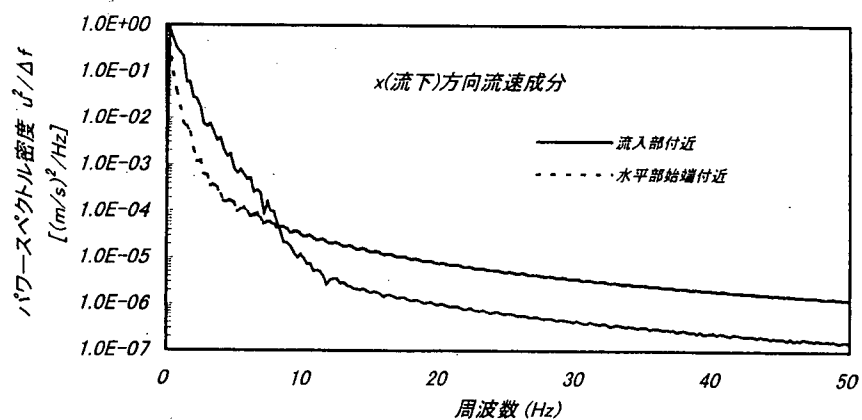


図-3.13 ポテンシャルコア近傍の流速変動

図-3.8~10には明確ではないものの卓越周波数が存在し、模型スケールが大きいほどその周波数は小さくなる。パワースペクトルが流量条件によらず一定の形状を取ることから、水槽の空間部において何らかの共鳴が生じていることが考えられる。しかし、狭い範囲の流量条件であり、流速変動の測定では現れていないものの、流れそのものにある種の共振現象が生じている可能性も否定できない。

3.7.2 音源出力

跳水音が始端部における流速変動や空気混入に伴うものとすれば、音源出力は流入水脈の運動エネルギーや流速に大きく依存するものと考えられる⁵⁾。始端部を線音源とみなせば、測点1での音圧実効値から音源の単位長さ当たりの出力は次式で求めることができる。

$$W = 2\pi r I = 2\pi r \frac{p^2}{\rho_a c} \quad (3-6)$$

ここに W : 単位幅当たり音源出力 [W/m], c : 音速 [m/s]

I : 音の強さ [W/m^2], p : 音圧実効値 [Pa]

r : 音源と測点の距離 [m], ρ_a : 空気の密度 [kg/m^3]

一方、単位時間単位幅当たりの流入エネルギーは次式で与えられる。

$$E = \frac{\rho_w q V^2}{2} \quad (3-7)$$

ここに E : 単位幅単位時間当たり流入エネルギー [J/s/m]

q : 単位幅流量 [$\text{m}^3/\text{s/m}$], V : 流入流速 [m/s]

図-3.14に、全実験ケースの音源出力と流入エネルギーとの関係を示す。これによれば、ばらつきはあるものの、音源出力と流入エネルギーには次式で表せる一定の比例関係があると考えられる。

$$W = \alpha E \quad (3-8)$$

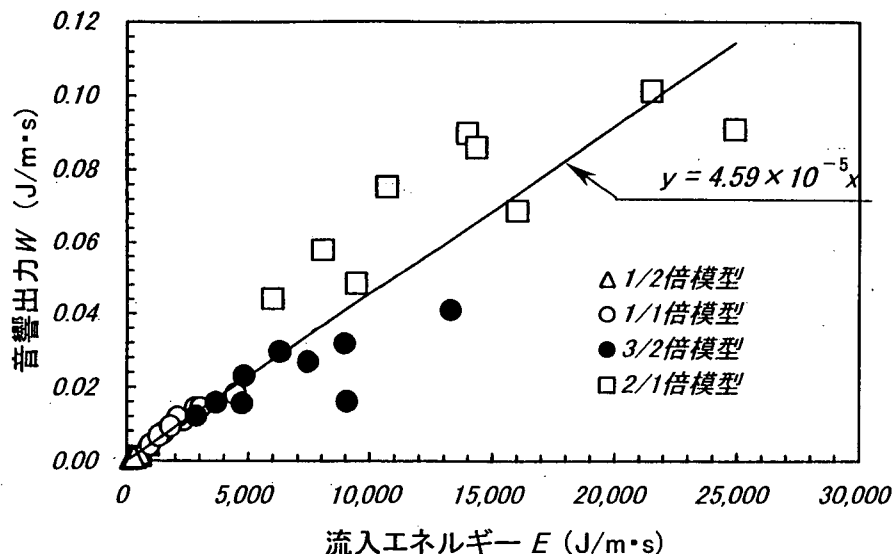


図-3.14 跳水の発生音と流入エネルギーの関係

ここでの比例定数 α は、跳水時における流れのエネルギーから音のエネルギーへの変換効率と考えられる。これとフルード数および模型縮尺との関係を図-3.15~16に示した。これによれば、変換効率はフルード数の変化すなわち流況の変化に対しても大きな変化を示しておらず、また、模型縮尺を変えてもほぼ一定の値を示している。したがって、今回の実験対象とした通常の洪水吐きの減勢対象流量条件下では、変換効率 α は、縮尺や流況に依らない減勢工形状固有の値を持つと解釈できる。本形状では、流入エネルギーの約 $5 \times 10^{-3}\%$ が音のエネルギーに変換される結果となっている。

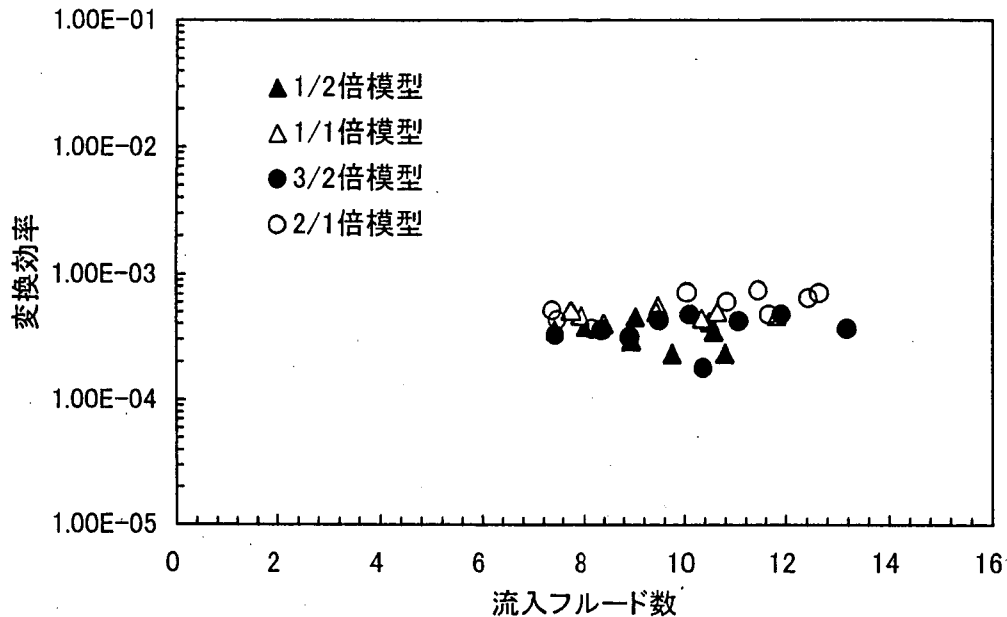


図-3.15 跳水時発生音と流入フルード数の関係

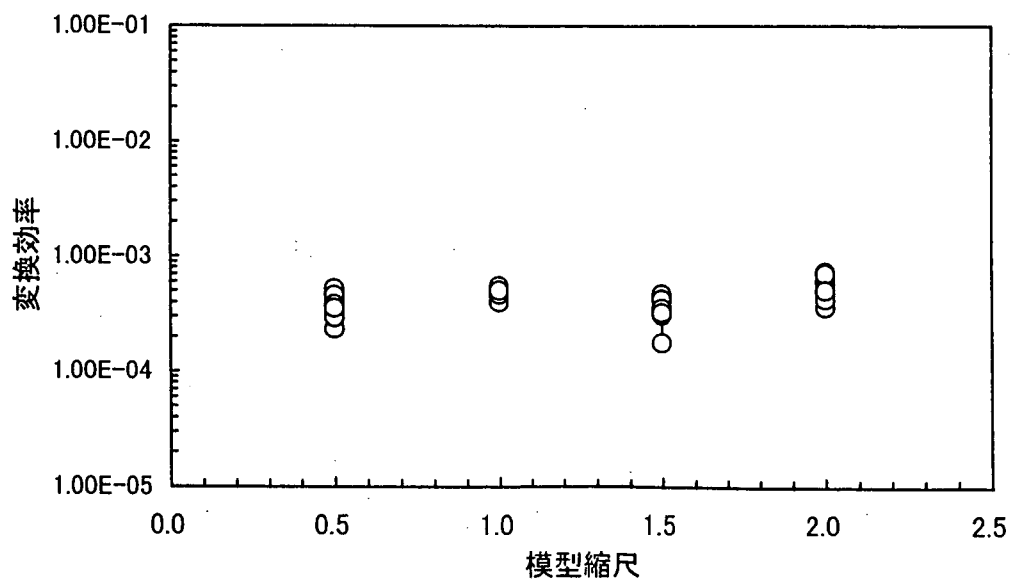


図-3.16 模型縮尺と変換効率の関係

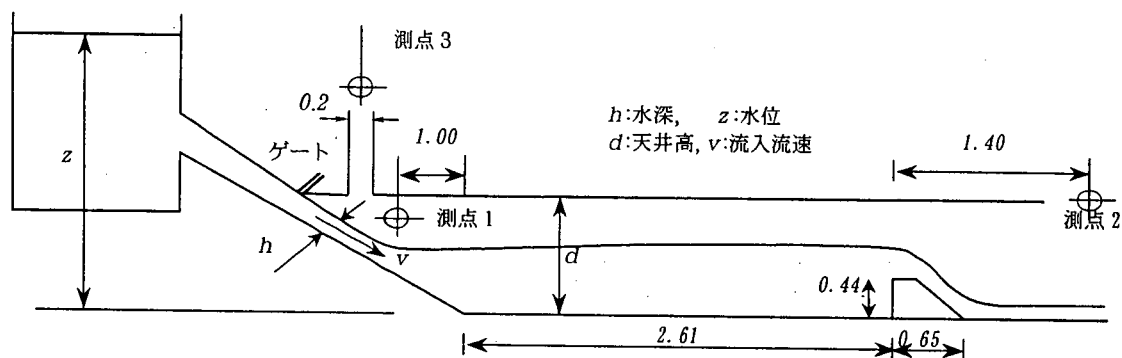
第4章 跳水時発生音のトンネル内における伝播特性

4.1 目的

前章で、跳水時の発生音特性について検討した。本章では、こうした跳水時発生音がトンネル内においてどのように伝播するのか、また、結果としてトンネル出口においてどのような特性を持った音が観測されるのか、前章同様水理模型実験による検討を行った。

4.2 実験模型

実験に用いた模型は、図-4.1に示すように第3章の実験に用いた模型にトンネル天端を加えた形状である。



注)1/1 倍模型の寸法を示した。(単位: m)

図-4.1 実験模型の概要

4.3 放流条件

放流条件は、第3章で行った実験と同様としたが(表-4.1)、測定は水理量の測定と同時に行っているわけではないので、表-4.1を目標としているものの実際の流量は若干は異なっている。ただし、その差はわずかであり、第3章と同様に以下の検討に際しては同一放流条件として取り扱っている。

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	フルード数 Fr	
1/2	43.5	1.50	1.29	9.7	3.76	10.6	1-1-b
		1.25	1.15	8.1	3.52	10.5	1-2-b
		1.00	1.03	6.2	3.01	9.5	1-3-b
		1.50	1.57	13.3	4.24	10.8	1-4-b
		1.25	1.48	11.0	3.72	9.8	1-5-b
		1.00	1.30	8.3	3.19	8.9	1-6-b
		1.50	2.33	20.1	4.31	9.0	1-7-b
		1.25	2.14	15.7	3.67	8.0	1-8-b
		1.00	1.87	11.9	3.18	7.4	1-9-b
1/1	87.0	3.00	2.44	28.0	5.74	11.7	2-1-b
		2.50	2.31	23.5	5.09	10.7	2-2-b
		2.00	2.00	18.2	4.55	10.3	2-3-b
		3.00	3.44	37.8	5.49	9.5	2-4-b
		2.50	3.03	31.4	5.18	9.5	2-5-b
		2.00	2.53	23.8	4.70	9.4	2-6-b
		3.00	4.76	54.6	5.74	8.4	2-7-b
		2.50	4.36	45.0	5.16	7.9	2-8-b
		2.00	3.65	33.8	4.63	7.7	2-9-b
3/2	130.5	4.50	3.39	51.5	7.60	13.2	3-1-b
		3.75	3.22	43.3	6.72	12.0	3-2-b
		3.00	2.86	33.5	5.86	11.1	3-3-b
		4.50	4.89	69.4	7.10	10.3	3-4-b
		3.75	4.36	57.6	6.61	10.1	3-5-b
		3.00	3.79	43.8	5.78	9.5	3-6-b
		4.50	6.84	100.4	7.34	9.0	3-7-b
		3.75	6.30	82.6	6.56	8.3	3-8-b
		3.00	5.63	62.1	5.52	7.4	3-9-b
2/1	174.0	6.00	4.68	78.8	8.42	12.4	4-1-b
		5.00	4.12	66.2	8.03	12.6	4-2-b
		4.00	3.68	50.6	6.88	11.4	4-3-b
		6.00	6.00	107.4	8.95	11.7	4-4-b
		5.00	5.58	89.4	8.01	10.8	4-5-b
		4.00	4.85	67.2	6.93	10.0	4-6-b
		6.00	9.76	156	7.99	8.2	4-7-b
		5.00	9.09	128.4	7.06	7.5	4-8-b
		4.00	7.48	94.5	6.32	7.4	4-9-b

4.4 測定方法

4.4.1 音の測定

(1) 測定位置

測定位置は、図-4.1に示すように、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。

(2) 測定機器

測定機器、FFT解析方法および暗騒音補正は第3章(3.4.1)と同様である。

4.5 伝播音の周波数特性

図-4.2~5に各模型縮尺の測点2における測定音のパワースペクトルの例を示した。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無次元化したパワースペクトルを示した。各模型とも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。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つことがわかる。得られたパワースペクトルは、図-3.8~10に示した音源のパワースペクトルとは異なった卓越周波数を持っており、跳水始端で発生した音が、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何らかの共鳴現象を起こしているものと考えられる。

図-4.6に各縮尺模型の比較(実験no.1-7-b,2-7-b,3-7-b,4-7-b)を示した。図中の矢印は上下流方向には上流を閉、下流を開とする気柱共鳴、高さ方向および幅方向には両端が閉じた気柱共鳴とした場合の0次の共鳴周波数を示したものである。これによれば、上下流方向および高さ方向の気柱共鳴は、測定音の卓越周波数とほぼ対応する。幅方向の共鳴は現れていないが、これは高周波帯には高次の共鳴が混在するためと考えられる。また、模型縮尺が大きいほど高さ方向の卓越周波数は不明瞭となるが、これも、上下流方向の高次の共鳴周波数との混在が増加してくるためと考えられる。

気柱共鳴として解釈できることを確認するために行った天端の高さを変えた場合のパワースペクトルの比較を図-4.7に示す。図中には各天端高に対応する高さ方向の共鳴周波数を付記している。図によれば高さ方向の共鳴に対応すると予想された300Hz付近の卓越周波数のみ変化しており、この解釈を裏付ける結果となっている。

なお、給気管直上(測点3)の測定結果を付図-4.1~4に示した。これらは卓越周波数がやや不明確なものの、測点2の観測音とほぼ同様な周波数特性となっている。音圧のオーバーオール値は、測点2に比較すると非常に小さく、音圧で1/10程度(音圧レベルで10dB小さい)となっている。

4.6 伝播特性

測定音は模型スケールが大きいほど低い卓越周波数を持っているが、前述のように音源も既に何らかの周波数特性を持っているので、ここでは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/音源

=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)

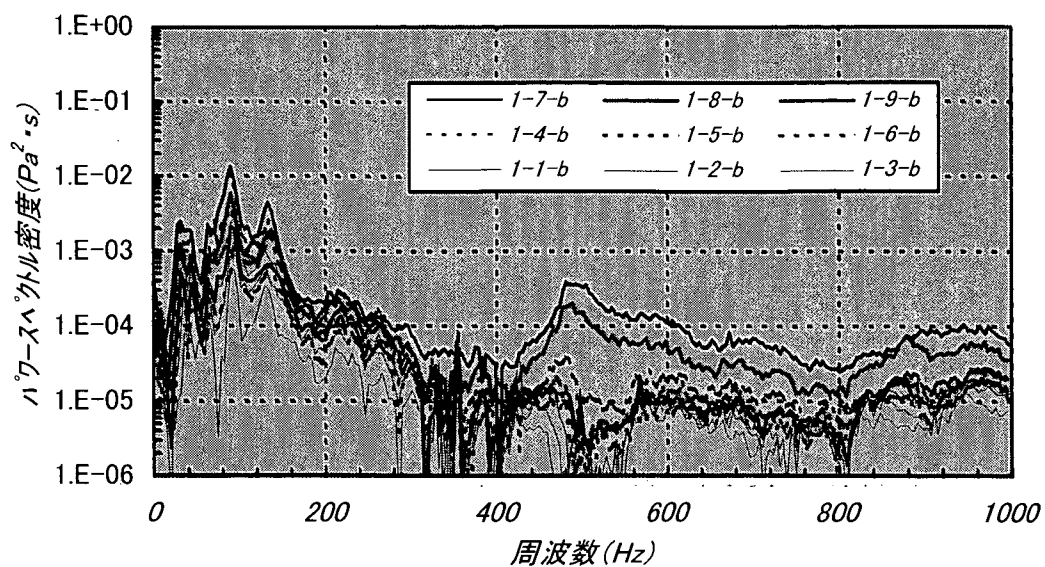


図-4.2a 0.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

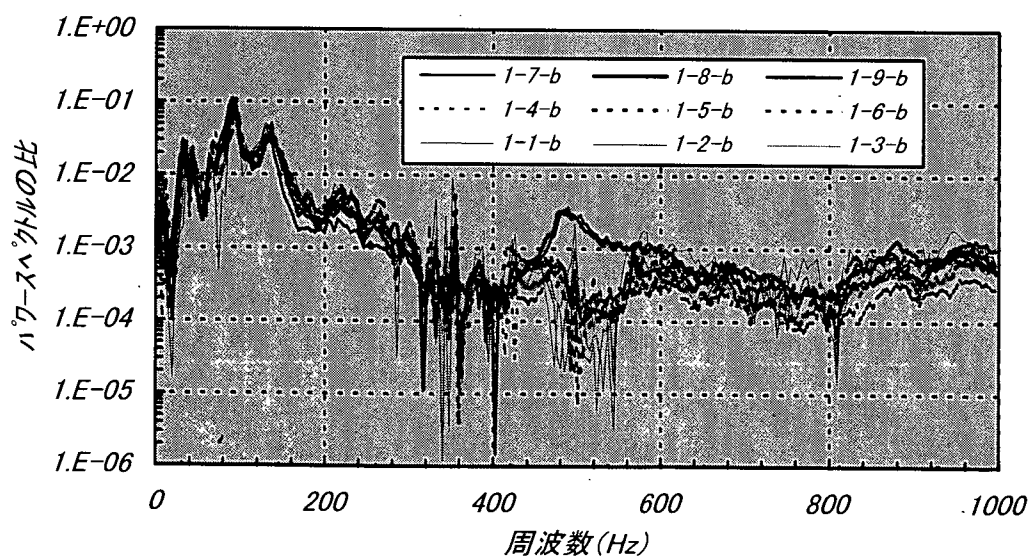


図-4.2b 0.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

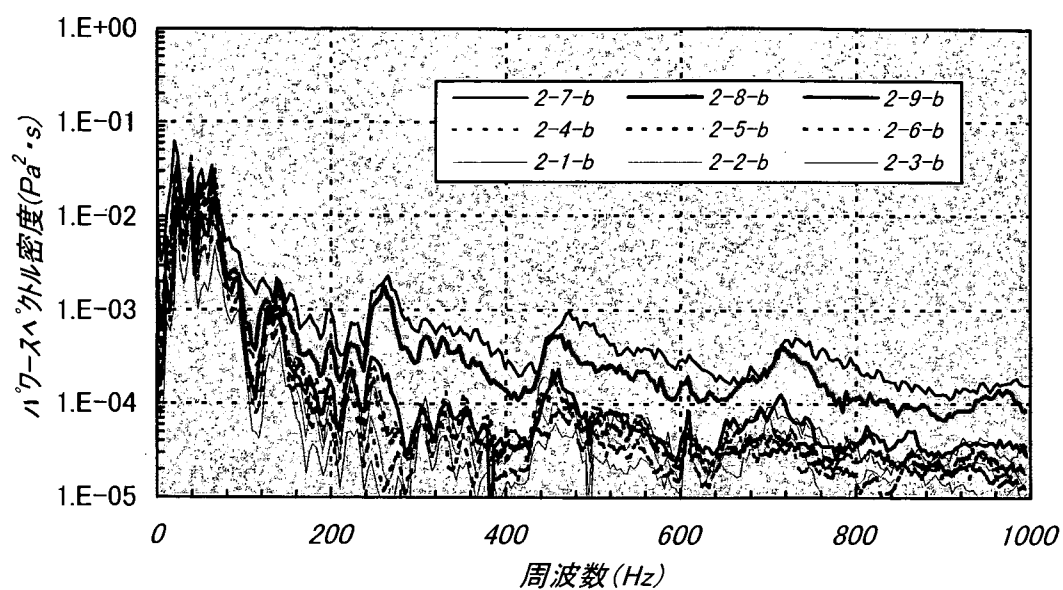


図-4.3a 1倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

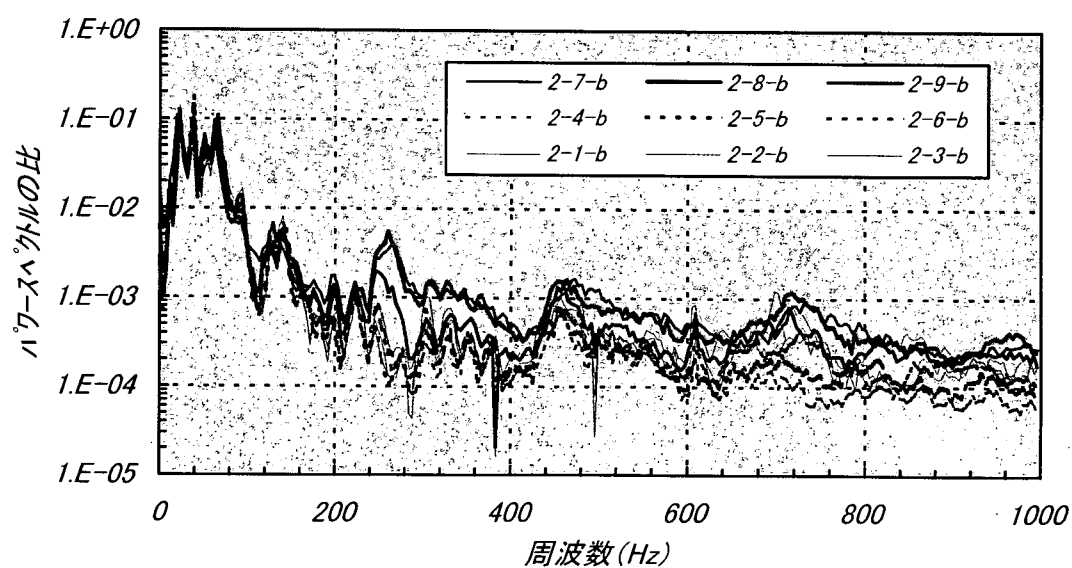


図-4.3b 1倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

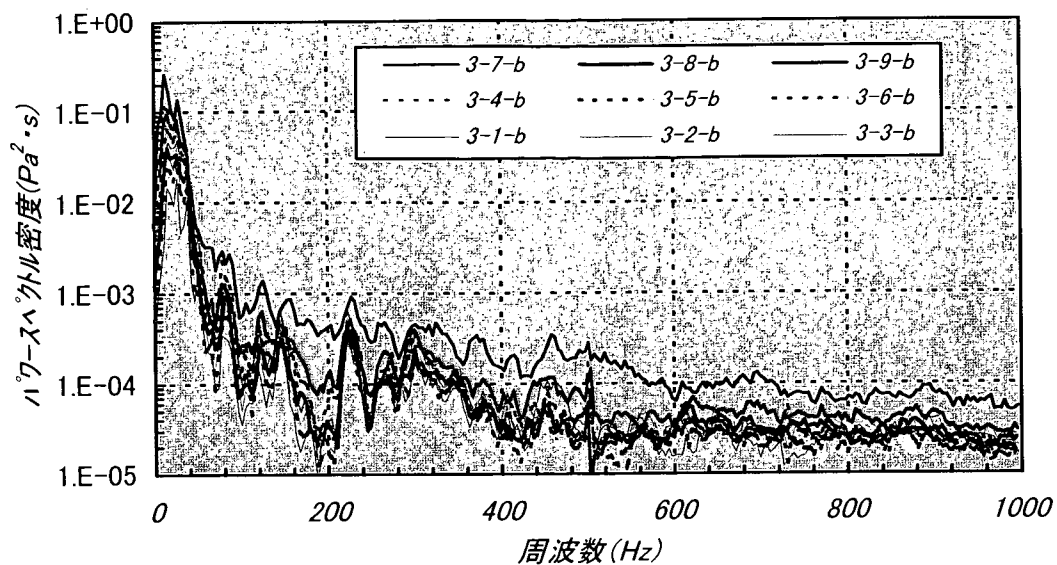


図-4.4a 1.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

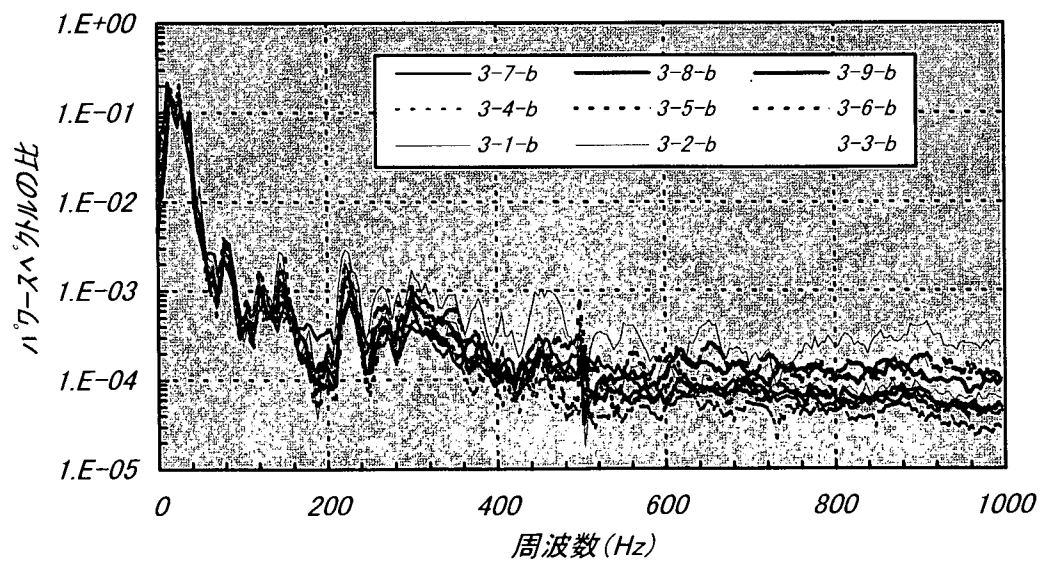


図-4.4b 1.5倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

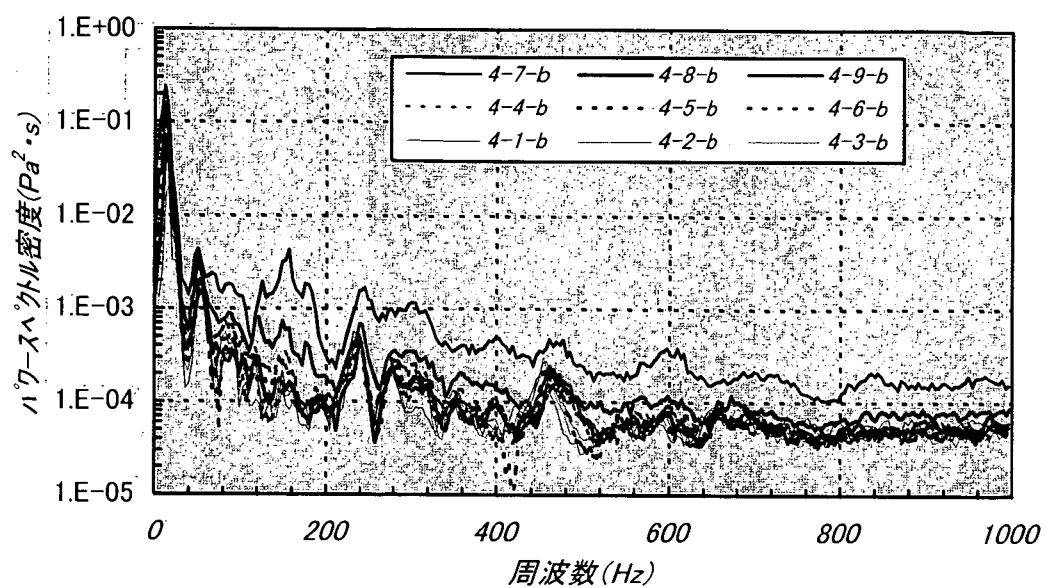


図-4.5a 2倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

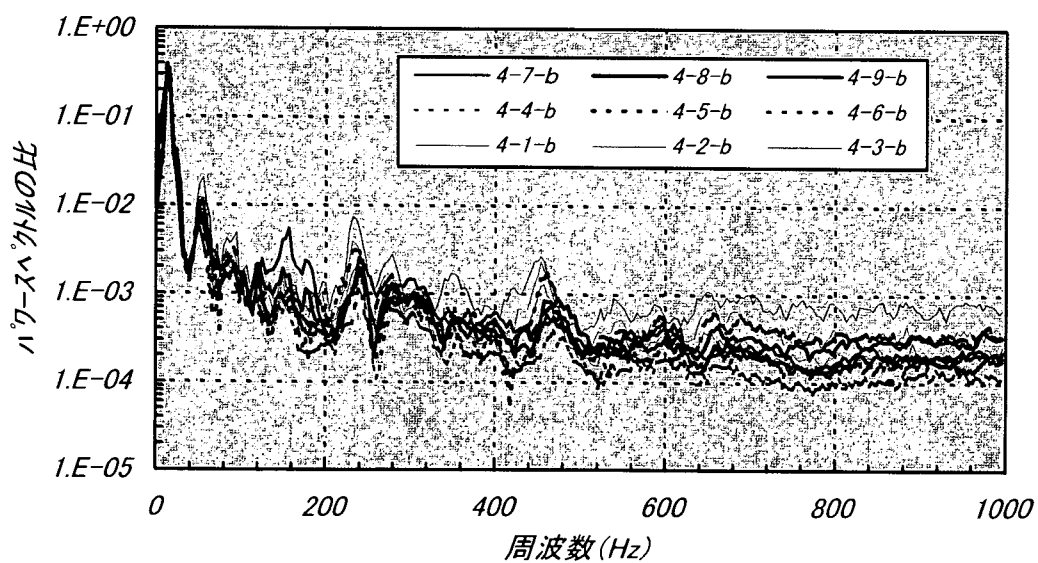


図-4.5b 2倍模型観測音（副ダム直下）のパワースペクトル分布

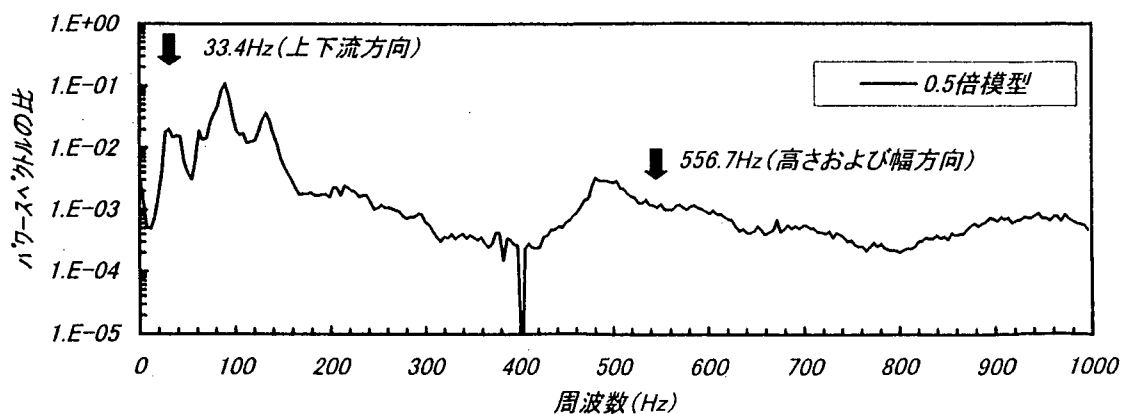
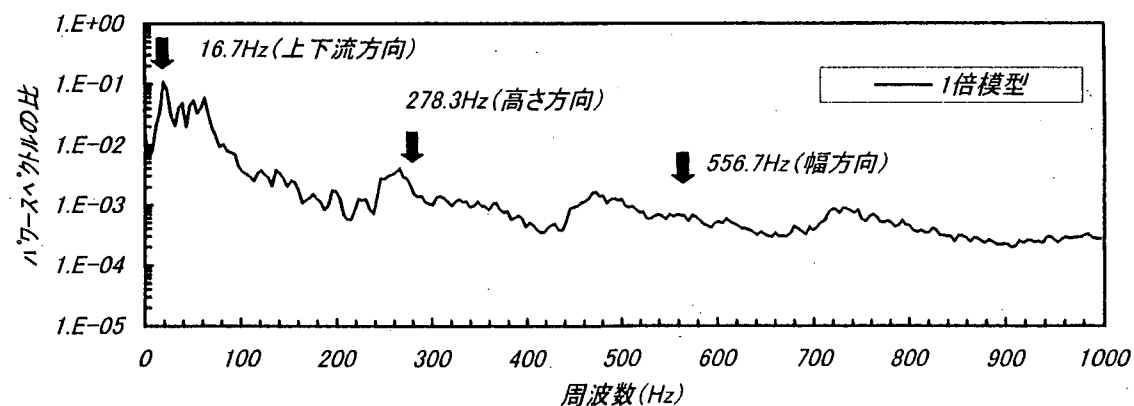
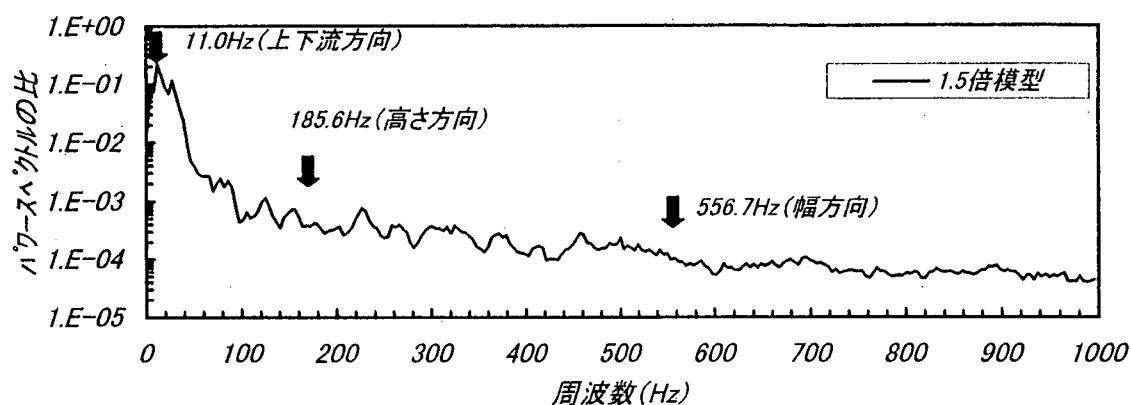
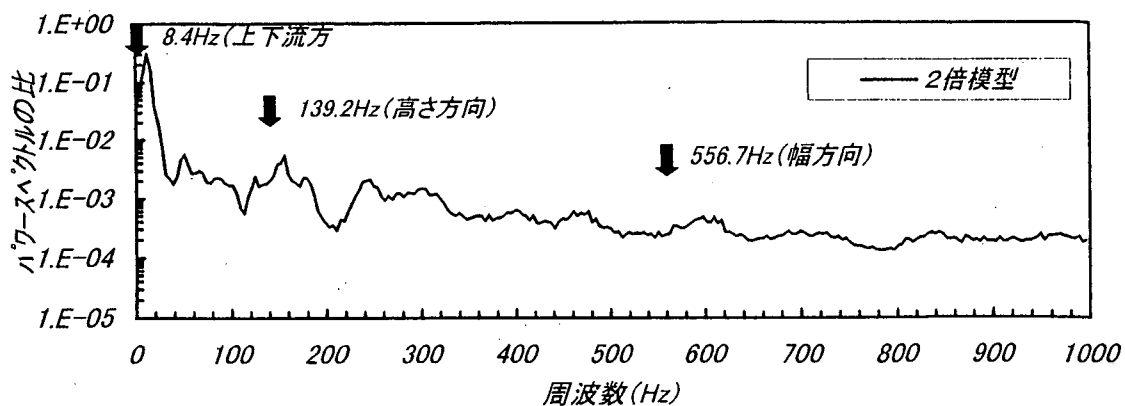


図-4.6 観測音 (副ダム直下) のパワースペクトル分布の比較

ここで、「天井を設けない場合の測点1の測定音」とは第3章に述べた同一放流条件における天端のないケースにおける跳水始端部直上の測定音である。

ただし、天端をはずした場合の測点1における測定音も何らかの共鳴を含んだ観測音であり、音源そのものの値ではない。また、天端を設けることによって、音源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、天端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、天端がない場合の観測音としてほぼ音源と見なせる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見なせるものになっている。

図-4.8~10に1倍、1.5倍および2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。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。

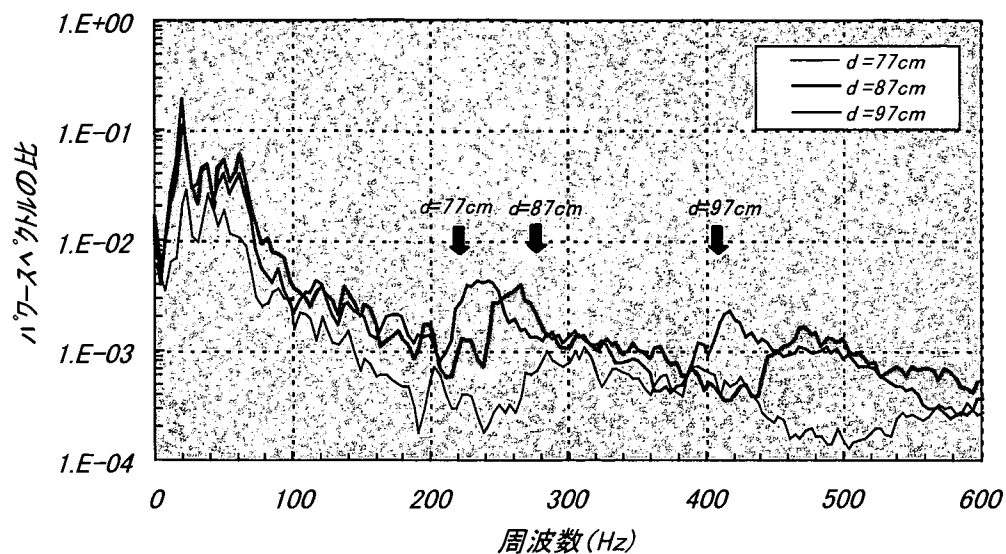


図-4.7 天端高さによるパワースペクトルの変化

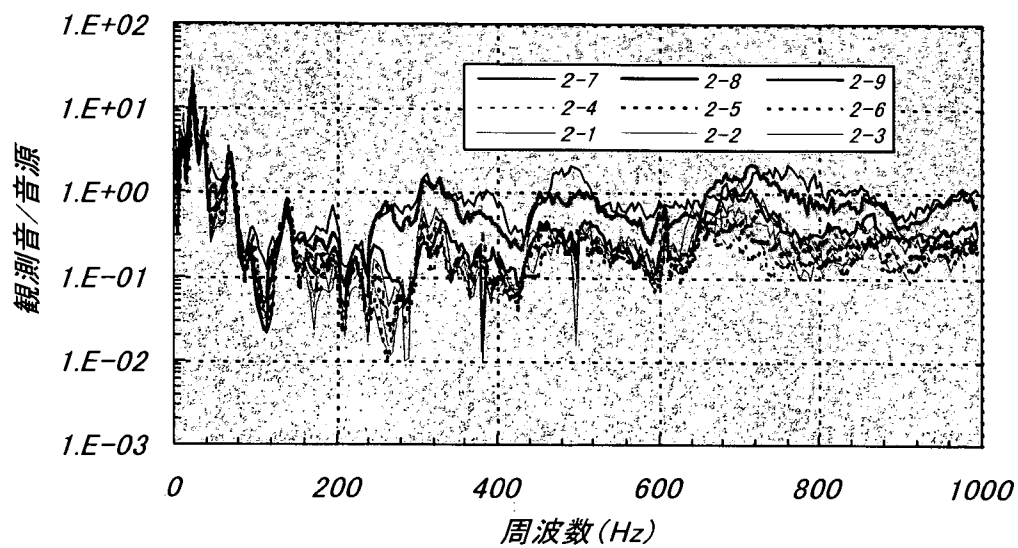


図-4.8 1倍模型（観測音／音源）のパワースペクトル分布

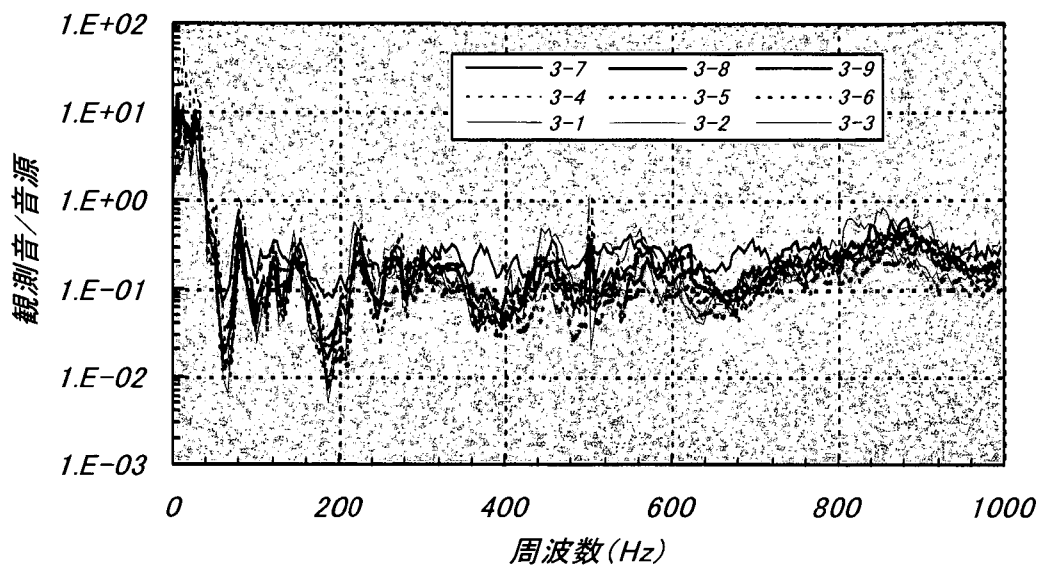


図-4.9 1.5倍模型（観測音／音源）のパワースペクトル分布

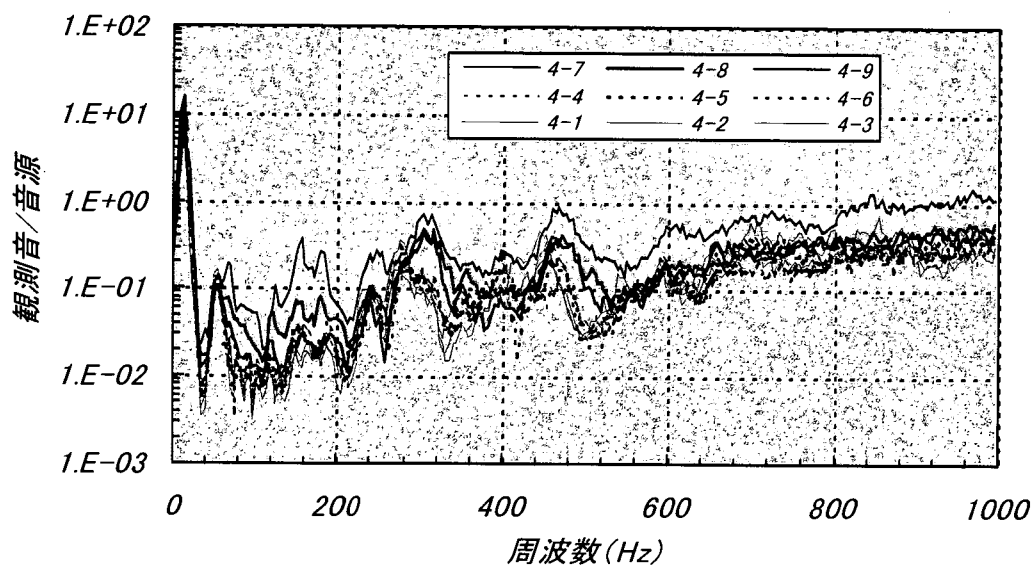


図-4.10 2倍模型（観測音／音源）のパワースペクトル分布

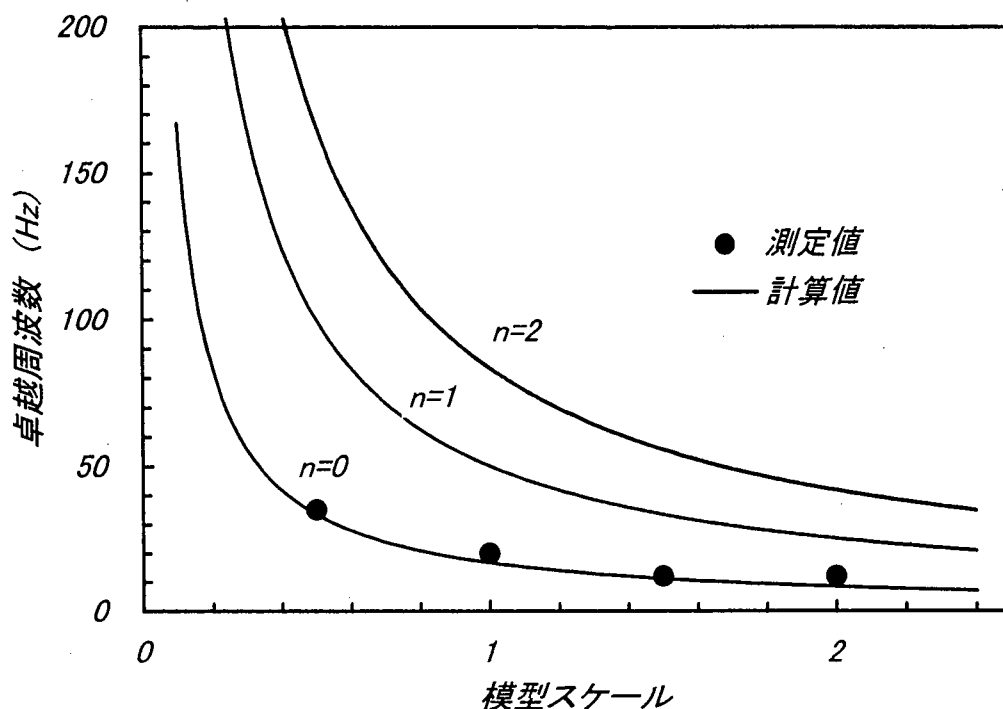


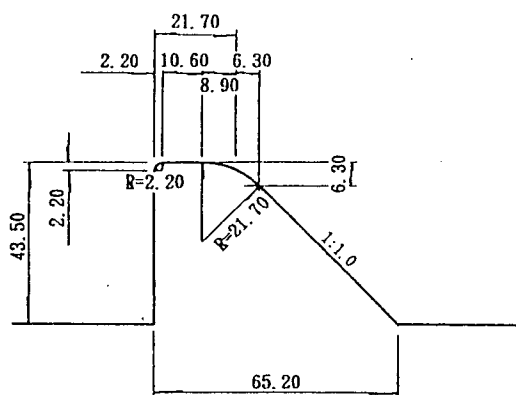
図-4.11 模型スケールと卓越周波数

図-4.11に得られた卓越周波数と模型スケールの関係を示した。計算値は、空間部分を上流側を閉、下流側を開とした上下流方向の気柱の0～2次モード共鳴周波数を示したものである⁶⁾。測定値は0次の計算値とほぼ一致し、跳水発生音は地下空間内を伝播する際に気柱共鳴を生じているものと考えることができる。

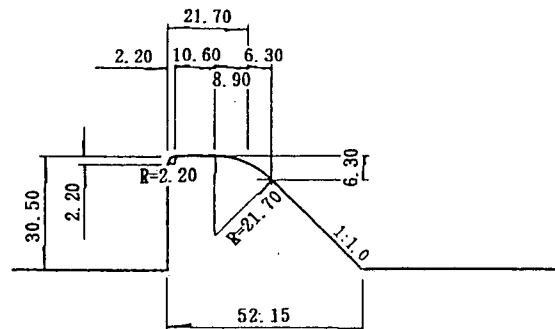
4.7 減勢工形状による伝播音の変化

1倍模型において、流量条件を表-4.1のままで、副ダム形状のみを図-4.12に示すように変えた実験を行った。ケース2～7における流況の変化を図-4.13に、測点2における観測音のパワースペクトルの変化を図-4.14に示した。このケースは実験ケースのうちで最も流況に差が生じたケースであるが、観測音のパワースペクトルは200Hz以上にわずかな差がみられるものの、低周波数帯における卓越周波数の分布形状はほとんど変化していない。最も変化の大きいのは300Hz付近の分布であり、これは前節の検討で高さ方向の共鳴と考えられた部分である。図-4.12に示したように副ダム高さを変えたことにより、空断面形状のうち始端部付近の高さが変化しており、これに対応して共鳴周波数付近の分布形状に変化が生じたと捉えることができる。ただし、その差はあまり明確ではない。また、音圧のオーバーオール値にも差はほとんど生じていない。

1倍模型を用いて副ダム形状を変えて実験を行った全てのケースについての測点2における観測音のパワースペクトルを図-4.15に、流況を付図-4.5～7に示しているが、いずれのケースについても副ダム形状を変えたことによる観測音への影響はほとんど現れていない。



[現形状]



[比較形状]

図-4.12 1倍模型副ダム形状

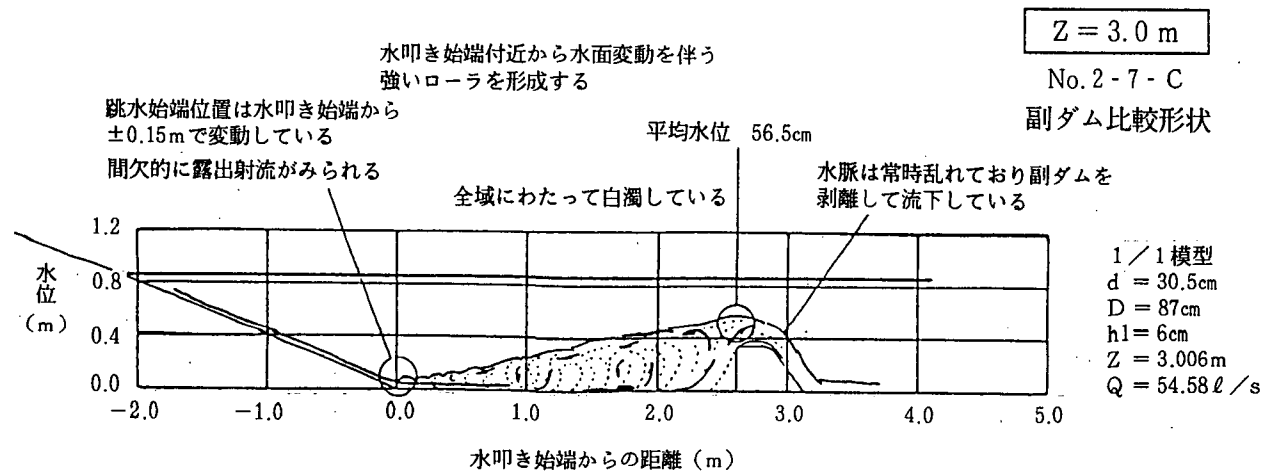
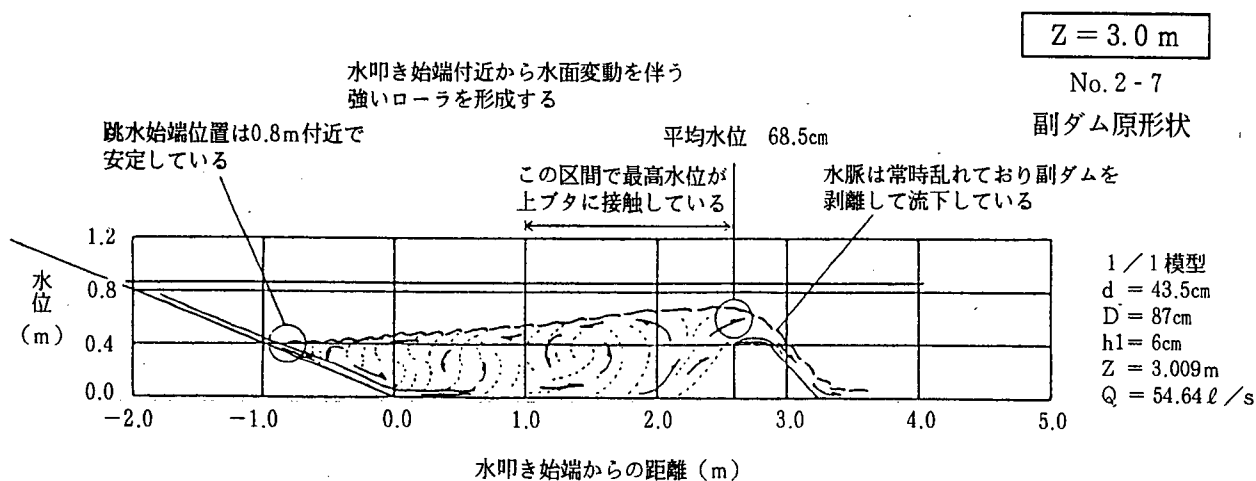


図-3.13 副ダム形状による流況の変化

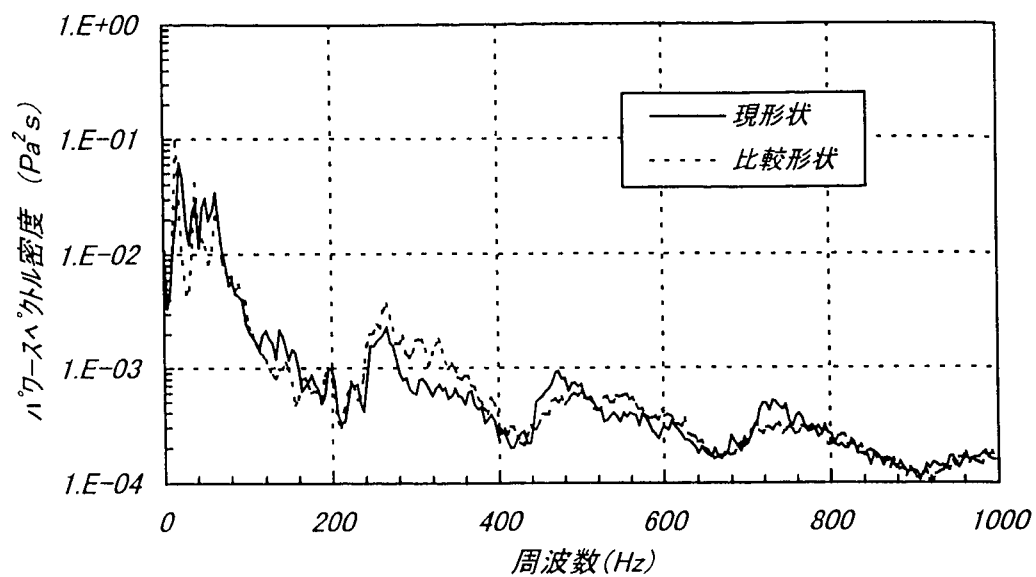


図-4.14 副ダム形状によるパワースペクトルの変化

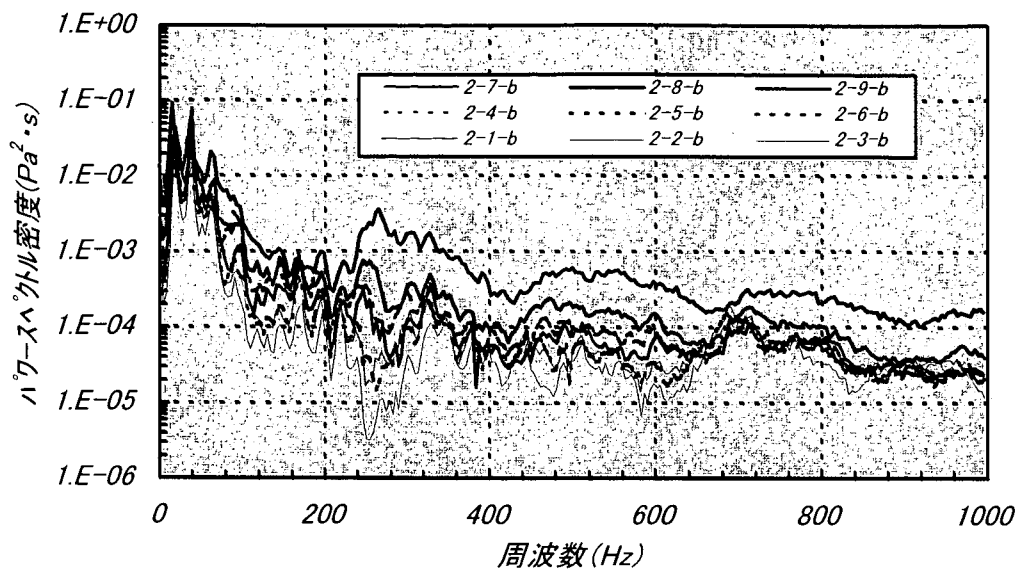


図-4.15a 1倍模型比較形状の観測音のパワースペクトルの変化

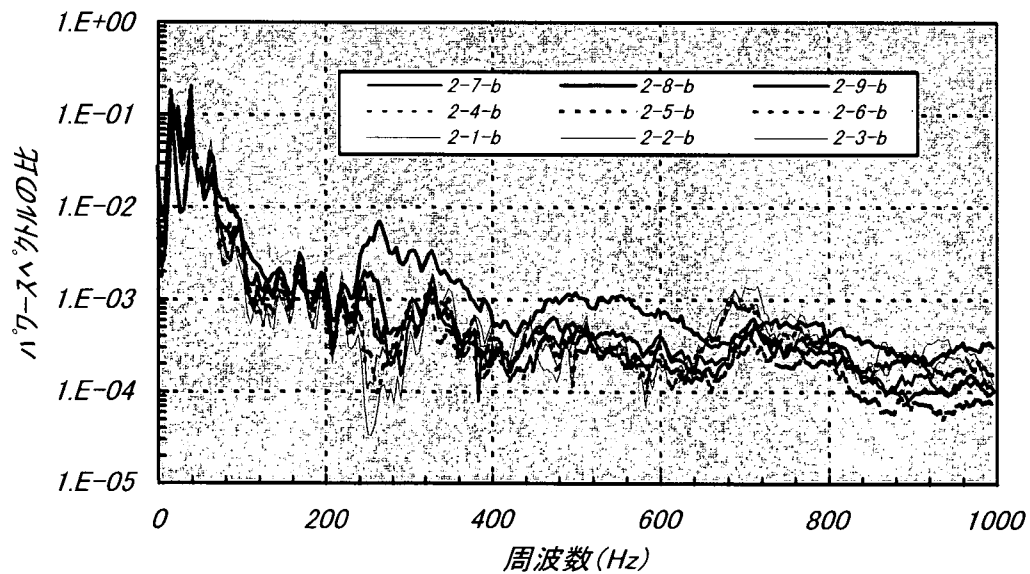


図-4.15b 1倍模型比較形状の観測音のパワースペクトルの変化

第5章 発生音の予測手法

5.1 音響実験における相似則

模型実験から実物の現象を求めるためには、観測対象となる現象に関係する物理量が模型と実物である一定の関係すなわち相似則を満たしていなければならない。音の伝播特性を扱う音響実験では、注目する音の波長と模型寸法の代表長さの相対的な関係が一致する必要があるので、 $1/n$ 縮尺の模型を用いるとすれば以下が成立している必要がある。

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{L_p}{L_m} = n \quad (5-1)$$

ここに λ : 波長、 L : 代表寸法

添え字 p は原型値を、 m は模型値をそれぞれ表している。(以下、同様)

実験を空気中で行うとすれば音速は変化しないので、周波数については以下の音の相似則が成立する⁷⁾。

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{c/\lambda_p}{c/\lambda_m} = \frac{1}{n} \quad (5-2)$$

ここに、 f : 周波数、 c : 音速

上記に基づいて模型の音源の周波数を原型の n 倍として換算を行うとすれば、境界面における音の反射、吸収に関して、(5-1) で与えられる原型および模型の周波数において、次式に示すように吸音率が一致している必要がある。

$$\beta_m(f_m) = \beta_p(f_p) \quad (5-3)$$

ここに β : 吸音率

通常、吸音材等の吸音率の大きな境界を対象とした音響実験においては、(5-3) 式が成立するように模型材質に工夫が必要とされるが、本検討のように原型(コンクリート)の吸音率が小さい場合、模型材料としてもアクリルなど吸収率が小さいものを用いていれば、(5-3) 式はほぼ成立していると考えられる。

また、空気音響吸収による減衰について考慮する必要がある場合は、模型における伝播距離が原型の $1/n$ となるので、減衰率が一致するために次式が成立している必要がある。

$$m_m(f_m) = n m_p(f_p) \quad (5-4)$$

ここに m : 空気中を伝播する音の減衰率

空気中を伝播する音の減衰率は、気温、湿度によって異なり、周波数が高いほど大きくなる。気温20℃、湿度60%における減衰率は、1kHzで0.002dB/m、10kHzで0.02dB/m程度⁸⁾なので低周波音を対象とする場合は無視し得る差である。

以上の音の相似則は、あらかじめ原型における音源の大きさや周波数特性が判明している場合に、建築物内あるいは屋外等においてどのように音が伝播していくかを模型実験によって推定する場合の模型値から原型値への換算手法および模型に要求される物理的な性質を規定するものである。したがって、第4章で述べたトンネル内における音の伝播特性についてはこれらの相似則の適用が可能であると考えら

れるが、第3章で述べた音源の出力や周波数特性を模型値から知るためには別途検討が必要である。これらについては5.2および5.3において検証および検討を行う。

5.2 跳水時発生音（音源）の予測手法

第3章にも述べたように跳水始端部における音の発生メカニズムは現時点では未解明であり、水理模型実験で得られた結果を原型値への換算する手法も明らかではない。また、模型値から原型値を推定する場合のもう1つの問題として、縮尺模型実験では、原型における全ての物理現象が相似になるわけではないこと、いわゆる縮尺効果についても注意が必要である。特に音の発生に大きな影響を与えると考えられる跳水時の気泡の発生状況（量、範囲、空気濃度、気泡の大きさ等）は原型とは完全には相似とならないことが知られている⁹⁾。通常、水理模型実験では、これに対処するために、実機の観測データなどに基づく補正が行われる。しかし、発生音に関しては、気泡の発生状況と発生音特性との関係が不明であるため、補正の必要性およびその方法は明らかではない。

そこで、実際のダムにおいて跳水時の発生音を測定し、対応する水理模型実験結果との比較を行い、水理模型実験から原型値を推定する方法について検討を行うこととした。

5.2.1 現地観測

(1) 放流設備の概要

現地観測は、天ヶ瀬ダム新設放流設備の減勢工と同様の型式を持ったAダムの常用洪水吐き減勢工において行った。Aダムの放流設備の概要を図-5.1に示した。当ダムの主な放流設備は最大 $100\text{ m}^3/\text{s}$ の放流を行う放流管形式の常用洪水吐き（以下、放流管と言う。）と、ダム設計洪水流量 $2,200\text{ m}^3/\text{s}$ を放流するための越流頂形式の非常用洪水吐きである。また、これらの放流水を下流に安全に流下させるために跳水式の減勢工が設けられている。発生音の測定は、これら施設のうち放流管からの放流時に行った。

(2) 放流条件

観測を行った放流条件を表-5.1に示した。ほぼ同様の水位条件のもとで放流管ゲートを徐々に開け、流量を $75\text{ m}^3/\text{s}$ まで $5\text{ m}^3/\text{s}$ ずつ増加させて測定を行った。したがって、着水時の流速は各流量条件ともほぼ等しく、流量の増加とともに流入水脈厚さが大きくなり、フルード数は小さくなっていく。

(3) 測定方法

測定位置は、音源と考えられる放流水の着水地点より約30m離れた減勢工側壁上である（図-5.3）。測定機器は3.4.1に示した実験に用いたものと同じものであり、同様のFFT解析および1/3オクターブ分析を行っている。なお、放流管からの放流時には同時にバルブおよび発電施設から放流を行っている。放流管からの放流の前にこれらのみ放流している場合の発生音を測定し、この測定音を暗騒音として補正を行っている。

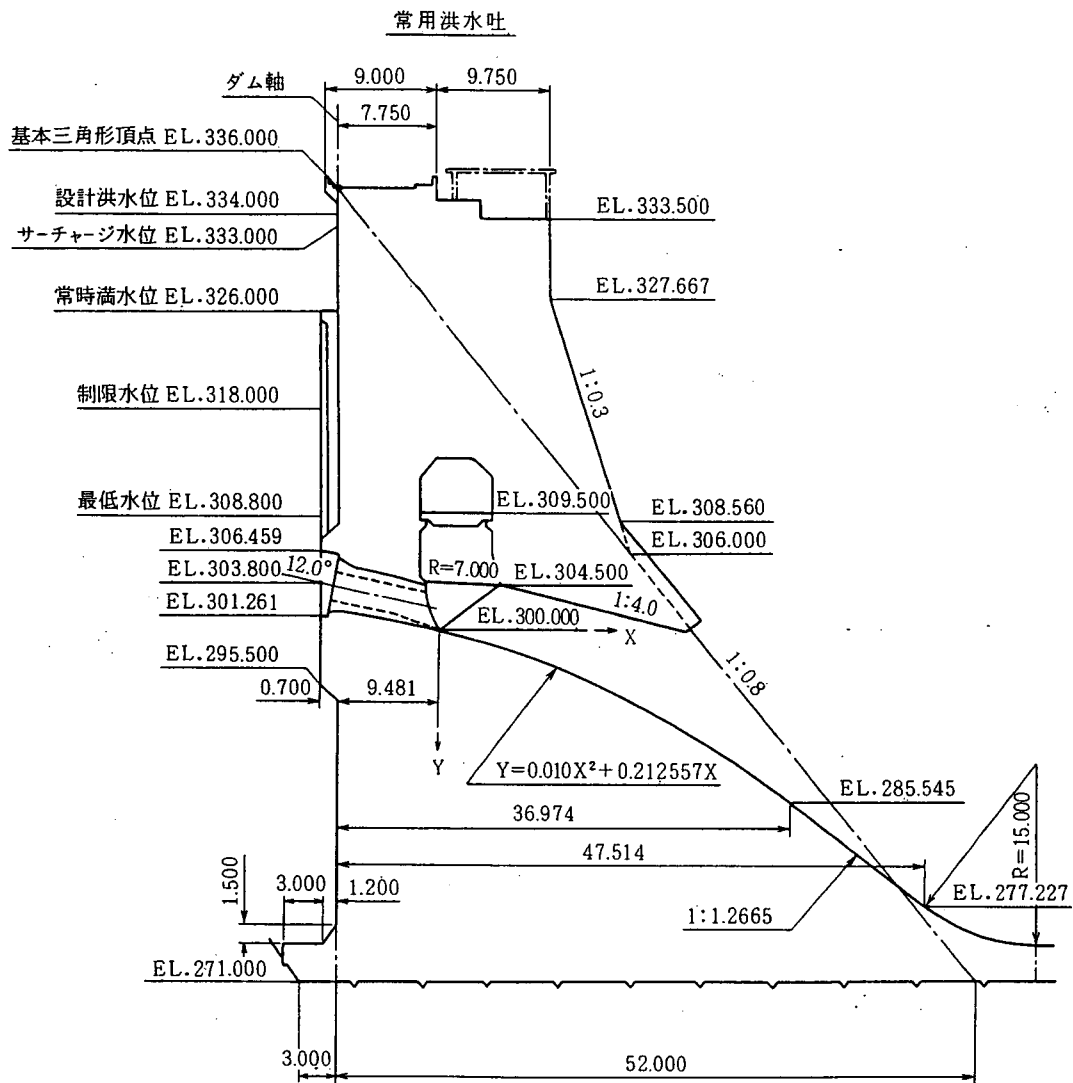


図-5.1 Aダム常用洪水吐き（放流管）縦断面図

図-5.2 Aダム洪水吐き減勢工縦断図

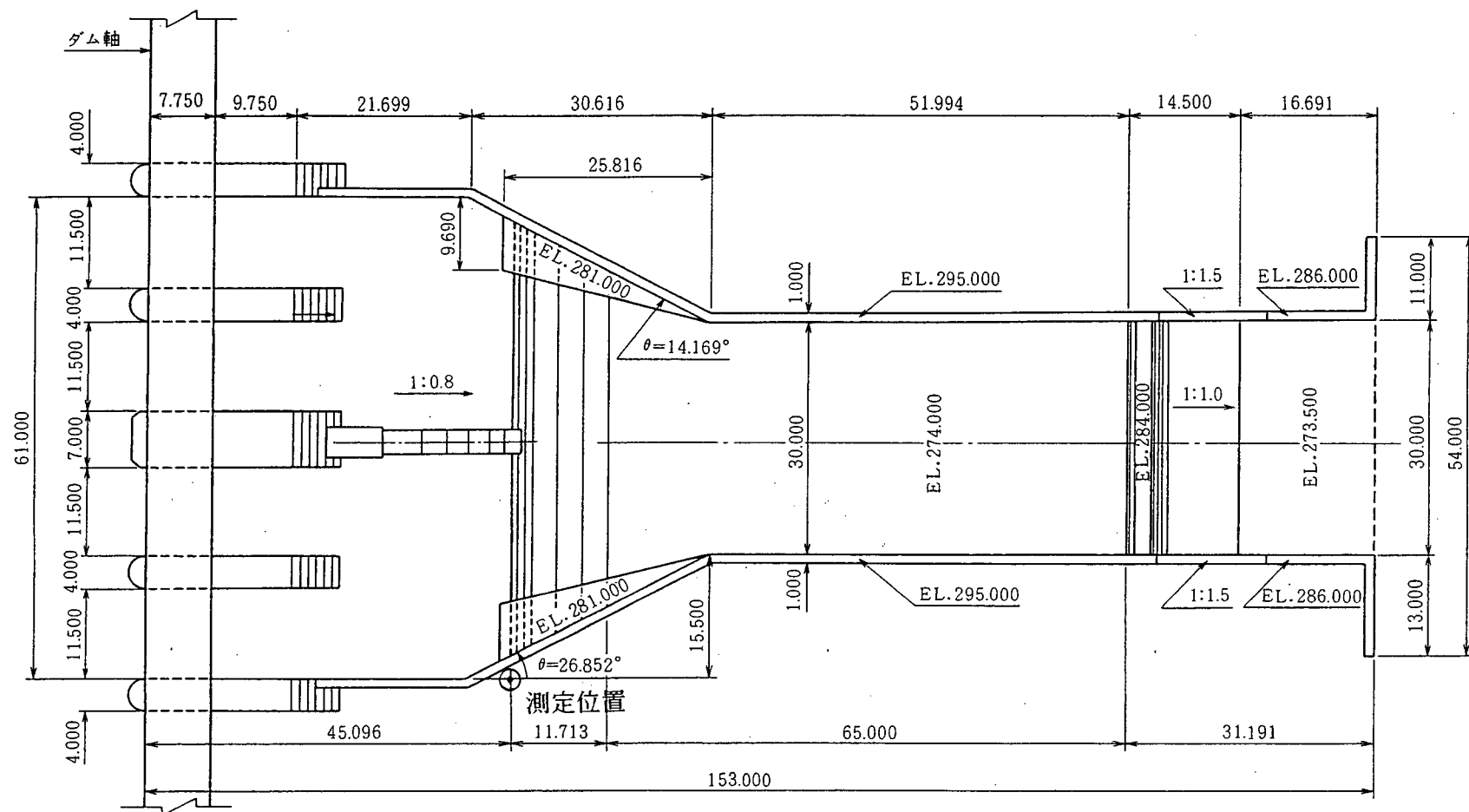


図-5.3 Aダム洪水吐き平面図および測定位置図

表-5.1 Aダム実測値

開度 G cm	流量 Q m ³ /s	流速		水脈厚さ d m	流入エネルギー E J/s × 10 ⁻³	暗騒音補正前		暗騒音補正後				流入 フルード数 Fr
		ゲート直下 V' m/s	着水時 V m/s			音圧レベル Lp dB	音圧 P Pa	音圧 P Pa	音響出力 W J/s × 10 ⁻³	音響出力 Lw dB	効率 %	
0	0.00					89.09	0.57	0.00	0.000000			
5	2.56	17.07	24.99	0.03	799	90.59	0.68	0.11	0.000314	114.972	0.00004	43.2
8	4.10	17.08	25.00	0.05	1,281	90.77	0.69	0.12	0.000406	116.080	0.00003	34.2
13	6.63	17.00	24.94	0.09	2,063	90.58	0.68	0.11	0.000311	114.924	0.00002	26.8
18	9.14	16.93	24.89	0.12	2,832	91.09	0.72	0.15	0.000596	117.749	0.00002	22.7
24	12.10	16.81	24.81	0.16	3,725	91.55	0.76	0.19	0.000951	119.782	0.00003	19.7
32	15.99	16.66	24.71	0.22	4,882	91.98	0.79	0.22	0.001381	121.403	0.00003	17.0
40	19.89	16.58	24.66	0.27	6,046	94.35	1.04	0.47	0.006150	127.889	0.00010	15.2
48	23.61	16.40	24.54	0.32	7,107	94.45	1.06	0.49	0.006478	128.115	0.00009	13.8
56	27.33	16.27	24.45	0.37	8,170	95.78	1.23	0.66	0.011929	130.766	0.00015	12.8
64	30.94	16.11	24.35	0.42	9,172	94.92	1.11	0.54	0.008104	129.087	0.00009	12.0
73	34.92	15.95	24.24	0.48	10,257	97.56	1.51	0.94	0.024175	133.834	0.00024	11.2
82	38.85	15.79	24.14	0.54	11,317	97.18	1.45	0.88	0.020977	133.217	0.00019	10.5
91	42.63	15.62	24.02	0.59	12,300	99.16	1.82	1.25	0.042428	136.277	0.00034	10.0
100	46.40	15.47	23.93	0.65	13,280	98.18	1.62	1.05	0.030329	134.819	0.00023	9.5
112	51.24	15.25	23.79	0.72	14,495	101.10	2.27	1.70	0.078967	138.974	0.00054	9.0
124	56.03	15.06	23.67	0.79	15,690	101.98	2.51	1.94	0.103182	140.136	0.00066	8.5
136	60.64	14.86	23.54	0.86	16,800	102.56	2.68	2.11	0.122319	140.875	0.00073	8.1
148	65.32	14.71	23.44	0.93	17,951	102.52	2.67	2.11	0.121203	140.835	0.00068	7.8
173	74.89	14.43	23.27	1.07	20,273	102.48	2.66	2.09	0.119462	140.772	0.00059	7.2

(4) 測定結果

各流量条件における測定結果を表-5.1に示した。着水時の流速は、ゲート直下の流速（流量／（ゲート開度×ゲート幅））に着水までの標高差による流速の増加分を加えた値で、ゲート下流の底面摩擦や空気混入による損失は考慮していない。また、流入フルード数を算出する際の水脈厚さにはゲート下流における空気混入や摩擦損失による水脈の変化は考慮されていない。図-5.4に流量と測定された音圧レベルの関係を示した。音圧レベルは流量の増加とともに大きくなるが、 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 以上ではほぼ横ばいとなる傾向が見られる。

図-5.5に各流量における周波数特性を示した。なお、原型の測定値は 5 Hz 以下の非常に低い卓越周波数を持つので、周波数特性を詳細に把握するために $1/3$ オクターブ分析を行っている。上段は音圧レベルを、下段はパワースペクトル密度をオーバーオール値で除して無次元化したパワースペクトルを示したものである。流量の増加に伴って各周波数帯における音圧レベルは増加するが、無次元化したパワースペクトルは流量によらずほぼ同一の周波数特性を持つことがわかる。また、バルブ放流音を併記しているが、この周波数特性は放流管における発生音と異なった傾向を示していることがわかる。

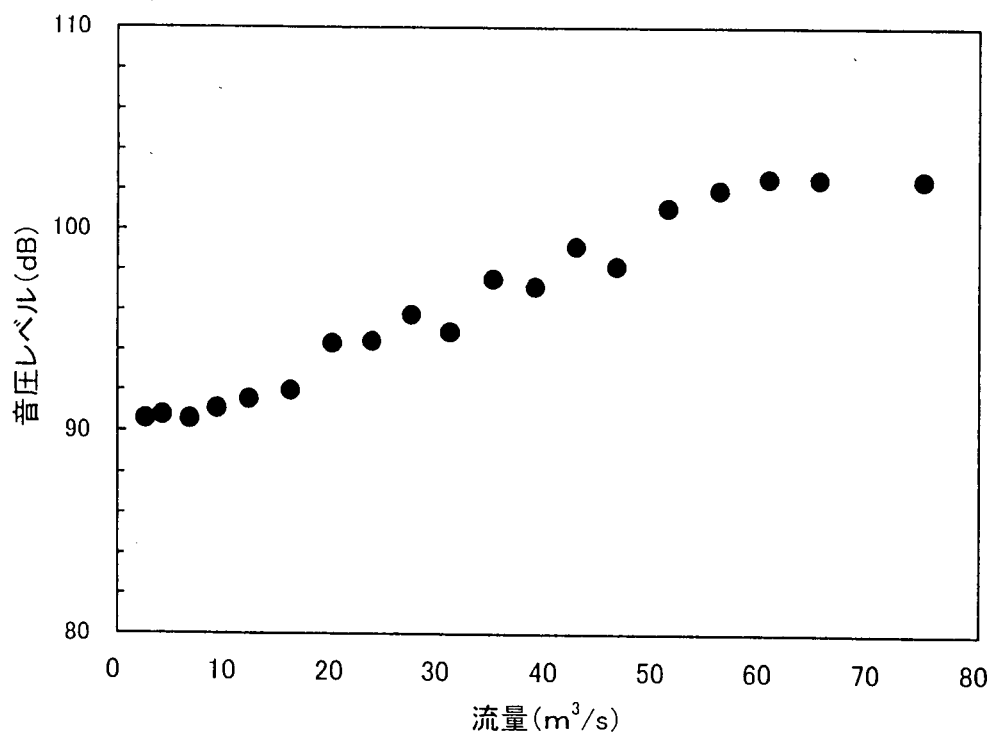


図-5.4 流量と音圧レベルの関係

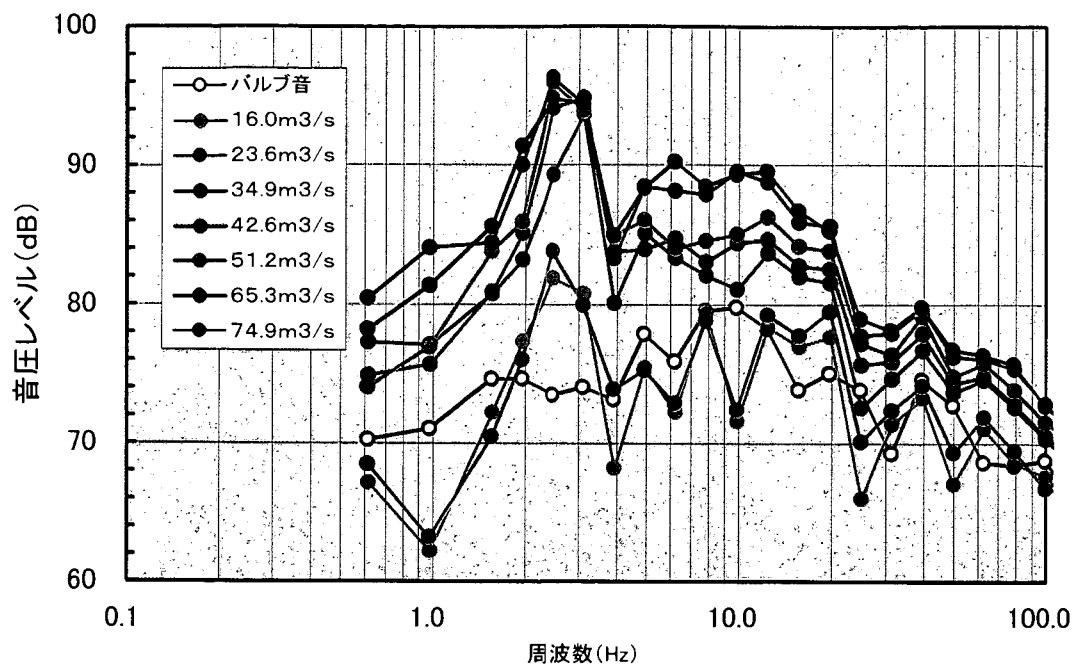


図-5.5a Aダム実測値の1/3オクターブ分析結果

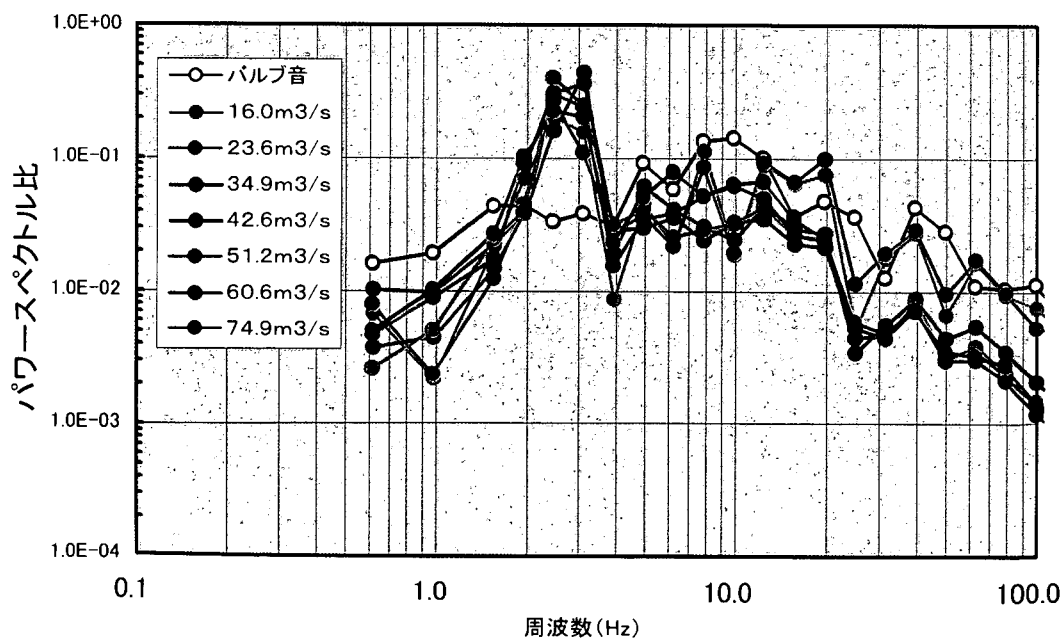


図-5.5b Aダム実測値の周波数特性

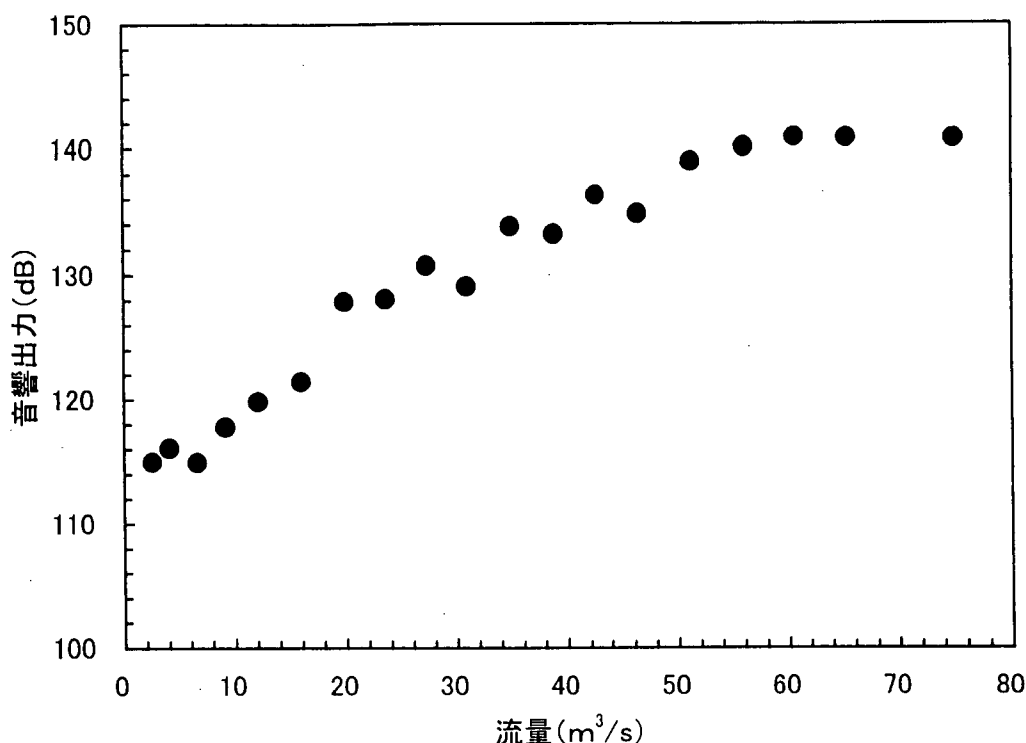


図-5.6 流量と音響出力の関係

(5) 変換効率の算出

変換効率を実験値と比較する準備として音源の音響出力を求める。Aダムの減勢工幅は放流管幅に比べて十分大きく、一方、堤体内での水脈は構造上横方向が拘束されているため拡散することなく減勢池の始端部に流入している。したがって、着水点を音源と考えれば、測定位置からは音源はほぼ点音源と見なすことができる。点音源における測定音圧と音響出力の関係は次式で表すことができる。

$$W = 4 \pi r^2 I = 2 \pi r^2 \frac{p^2}{\rho_a c} \quad (5-5)$$

ここに W : 音源出力 [w]、 c : 音速 [m/s]、 I : 音の強さ [w/m²]、 p : 音圧実効値 [Pa]

r : 音源と測点の距離 [m]、 ρ_a : 空気の密度 [kg/m³]

レベル表示では次式となる。

$$L_w = L + 20 \log r + 11 \quad (5-6)$$

ここに L_w : 音源出力 [dB]、 L : 測定音圧レベル [dB]、 r : 音源と測点の距離 [m]

上式を用いて各流量時の音響出力レベルを計算すると図-5.6となる。

次に流入エネルギーの算出を行う。各流量時における水理量は表-5.1に示したとおりである。跳水始端部における単位時間当たりの流入エネルギーは次式で与えられる。

$$E = \frac{\rho_w Q V^2}{2} \quad (5-7)$$

ここに E : 単位時間当たり流入エネルギー [J/s]、 Q : 流量 [m³/s]、 V : 流入流速 [m/s]

また、変換効率については、単位幅あたりで表現されている (3.7) と同様、(5-5) および (5-7) で計算される音響出力および流入エネルギーを用いて次式で計算できる。

$$W = \alpha E \quad (5-8)$$

ここに、 W : 音源出力 [w]、

E : 単位時間当たり流入エネルギー [J/s]

式(5-5)および(5-7)を用いて、流入エネルギーと音響出力の関係を求めると図-5.7となる。図に示すように流入エネルギーと音響出力はほぼ比例関係とはなっているが、流入エネルギーがほぼ5,000J/Sを超えた付近でやや勾配が変化している。(5-8)式を用いて求めた音への変換効率と流量の関係を示したものが図-5.8である。これによれば、変換効率は流量の増加とともに緩やかに増加し、増加傾向は流量が大きいほど小さい。目視による流況観察では、低流量時には、減勢池内の水位はほぼ一定であり、放流管からの水脈による影響は着水点付近に限られている。しかし、流量が増加すると減勢池内の水面は変動を始め、変動量は流量の増加とともに大きくなる。音への変換効率の変化はこうした流況の変化に対応していると考えられる。

5.2.2 跳水時発生音の予測手法の検討

(1) 再現実験 (追加実験)

水理模型実験結果から原型値を推定する手法を確認するために第3章で行った実験に加えて、現地観測時の再現実験を行った。実験に用いた模型は、第3章で用いた模型とほぼ同じものである (図-5.9)。縮尺は1/16としたが、シュート部はほぼAダム放流管の平均勾配に近い1:2.5の直線形状としており、バケットカーブは再現されていない。なお、実験に用いた模型はこれまでの実験同様2次元模型であり、流況の3次元性は再現されていない。また、流量条件は、現地観測を行った範囲がカバーできるように、実験装置の許す範囲で、できるだけフルード数が大きく変化できるように定めた (表-5.2)。結果として、フルード数は5~13の範囲となっている。なお、第3章の実験も模型形状はほぼ再現実験と同様であり、限定したフルード数の範囲(8~12)において、縮尺を変えてAダムの再現実験を行っていると考え

表-5.2 Aダム再現実験

流入水理条件					始端部測定音圧		音源出力		音への変換効率
流入水脈 h' cm	流量 Q l/s	流速 v m/s	流入エネルギー E/B J/(m ² ·s)	フルード数 Fr	圧力 P_{rms} Pa	レベル L_p dB	出力 W/B J/(m ² ·s)	レベル L_w dB	
5.38	101.54	9.44	22,630	13.0	2.2839	101.2	0.0396	65.9	1.75E-04
5.13	90.94	8.86	17,845	12.5	2.2377	101.0	0.0380	65.6	2.13E-04
4.85	78.74	8.12	12,969	11.8	2.0731	100.3	0.0326	64.3	2.52E-04
4.70	72.28	7.69	10,678	11.3	2.0192	100.1	0.0310	63.8	2.90E-04
4.46	61.78	6.93	7,413	10.5	1.7795	99.0	0.0241	61.6	3.25E-04
4.20	50.62	6.02	4,594	9.4	1.5028	97.5	0.0172	58.7	3.74E-04
3.97	40.48	5.10	2,635	8.2	1.2140	95.7	0.0112	55.0	4.25E-04
3.74	30.86	4.12	1,310	6.8	0.9044	93.1	0.0062	49.8	4.74E-04
3.48	19.46	2.80	380	4.8	0.8824	92.9	0.0059	49.4	1.56E-03
3.26	10.02	1.54	59	2.7	0.5014	88.0	0.0019	39.6	3.23E-03

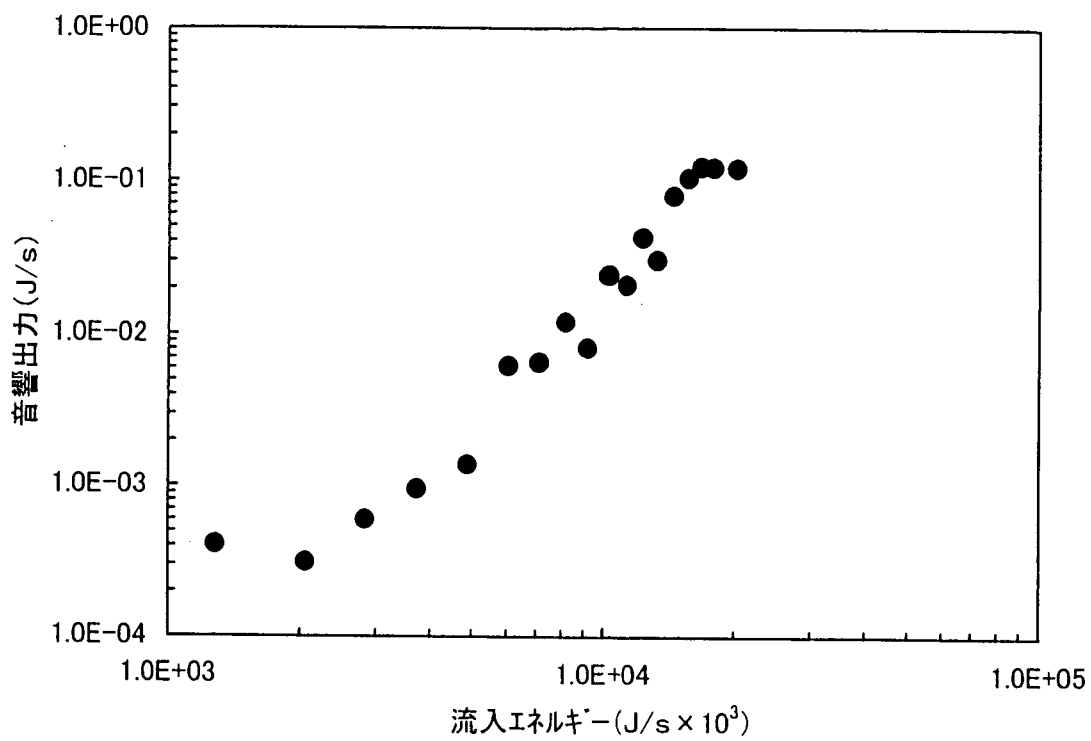


図-5.7 流入エネルギーと音響出力の関係

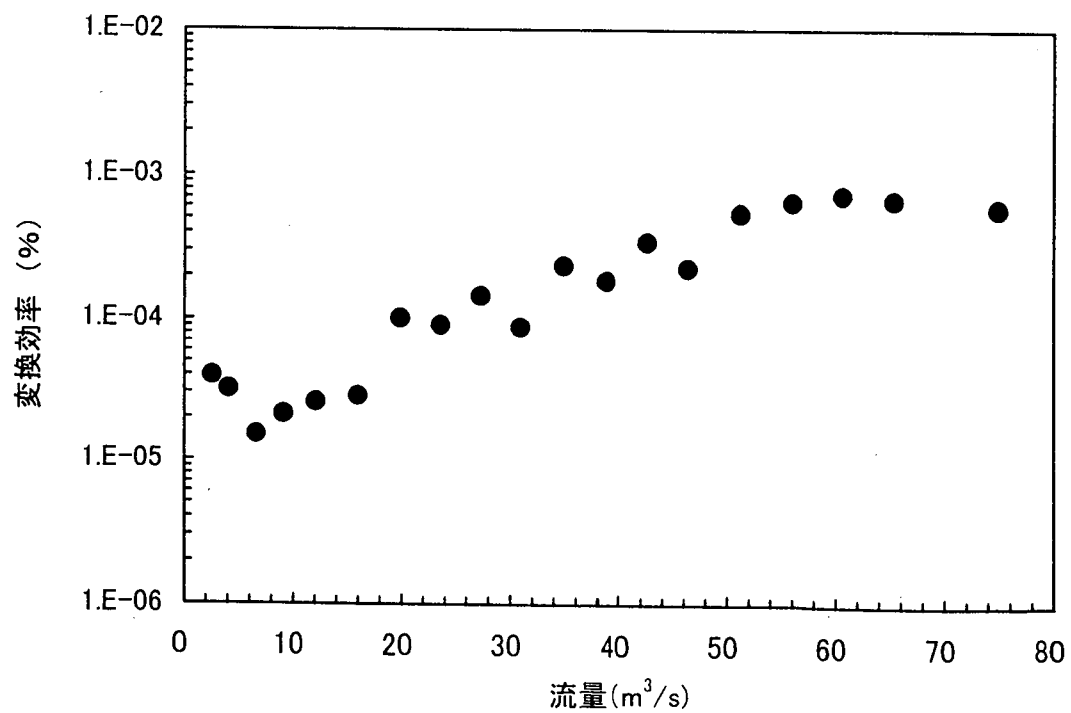


図-5.8 流量と変換効率

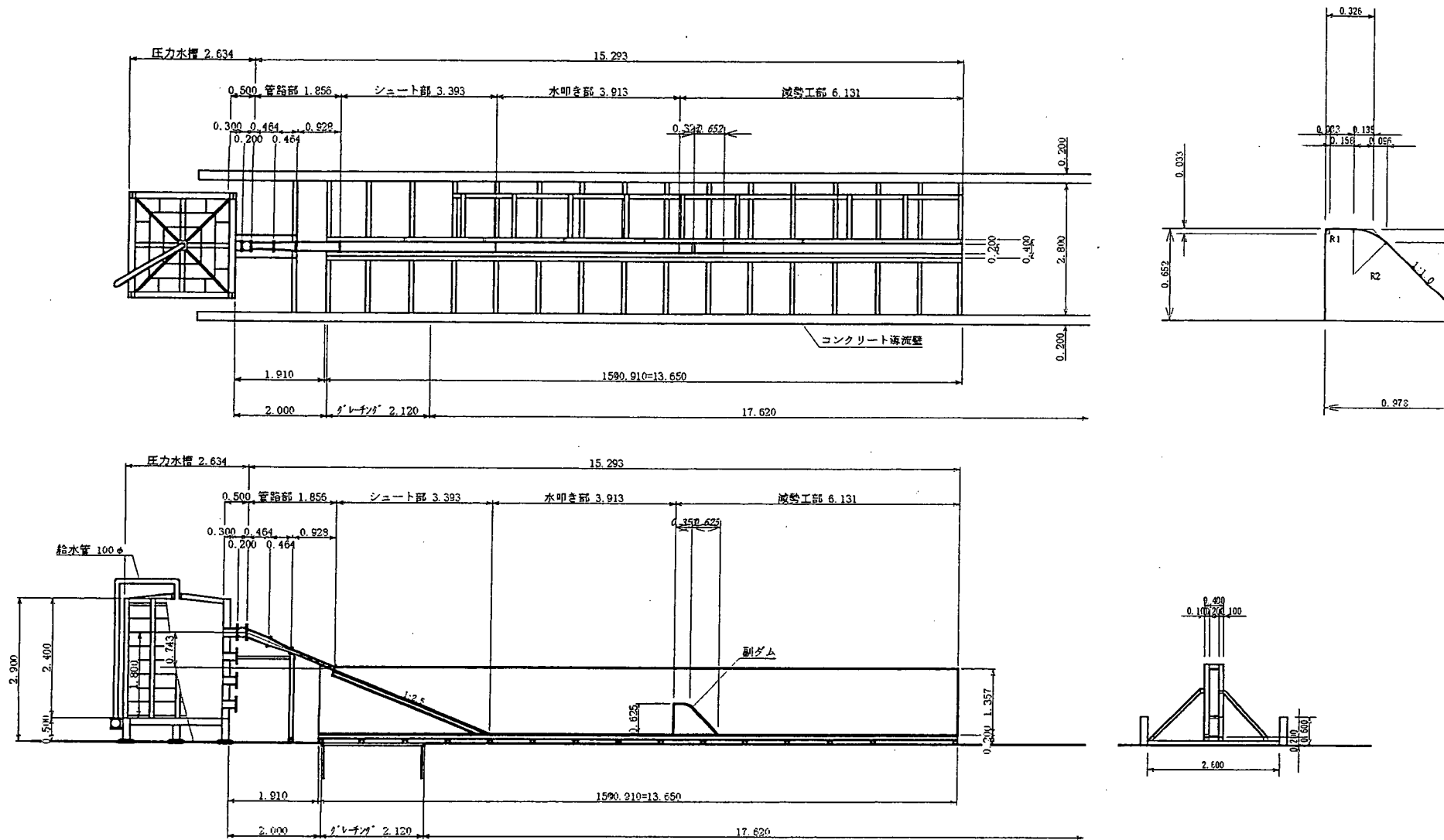


図-5.9 Aダム再現実験模型

えてもよい。したがって、以降の検討では第3章の実験結果も併せて現地観測結果との比較を行っている。

(2) 変換効率

最初に、音響出力のオーバーオール値（全周波数の合計値）についての比較を行う。現地観測結果と実験値におけるオーバーオール値の変換効率を図-5.10に示した。図に示したように、両者ともフルード数の増加とともに変換効率が低減する傾向は一致しているが、実験値はやや低減が緩やかである。これは、これまで述べてきたように、空気混入量の違い、音の発生メカニズムの違いなどに起因するものと考えられる。空気混入状況についての目視による観察では、水脈がゲートから放流されてから減勢池に着水するまでの間に生じる空気混入の状況に模型と実物では大きな相違が見られた。現地観測では、フルード数大きい、すなわち水脈が薄い流れでは水脈全体に境界層が発達し、減勢池に着水する前に大量の空気を混入している状況が確認されているのに対して、模型実験においては着水前の水脈に空気混入はほとんど生じておらず、当然フルード数の違いによる空気混入の違いも生じていない。

しかし、図-5.10に見られるように現地観測と模型実験による変換効率の違いはわずかなので、若干の安全を見込めば、模型実験で得られた変換効率をそのまま原型値に適用しても実用上十分な精度で原型における音源の音響出力を予測することが可能であると考えられる。なお、具体的には(5-7)式を用いて原型における流入エネルギーを算定し、これに(5-8)式に示すように模型実験で求めた変換効率を乗じれば音響出力を求めることができる。

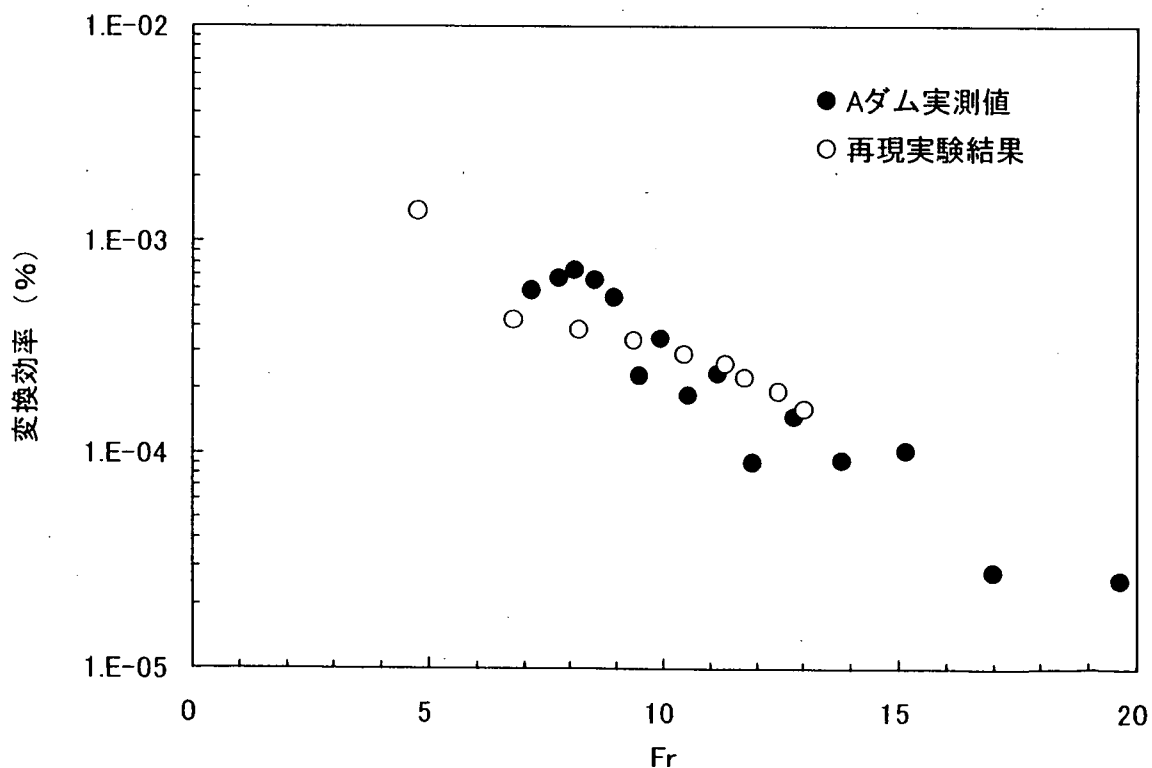


図-5.10 変換効率の実測値と再現実験の比較

(3) 周波数特性

模型において発生する音を原型値に換算するためには、模型において観測されたある周波数の音が原型値においてどのような周波数となるかを求める必要がある。

水理模型実験においては、水理現象は重力が卓越した現象と考えられることからフルード相似則に基づいて実験が行われる。すなわち

$$Fr = \frac{\nu_p}{\sqrt{gL_p}} = \frac{\nu_m}{\sqrt{gL_m}} \quad (5-9)$$

ここに、 Fr ：フルード数、 ν ：流速、 L ：代表寸法
が成立するように流速および模型寸法が設定される。当然、本検討における実験も水理的な条件についてはフルード相似に基づいて条件が設定されている。したがって、(5-9)式より時間および流速について以下の関係が成り立っている。

$$\frac{\nu_p}{\nu_m} = \frac{T_p}{T_m} = \sqrt{n} \quad (5-10)$$

いま、跳水時に発生する音の周波数が流れの周期的な変動によって発生しているとすれば(5-10)式から模型と原型の周波数の関係式として次式が得られる。

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{\nu_p/L_p}{\nu_m/L_m} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (5-11)$$

また、第3章の実験結果では周波数特性は流量（流速）等の水理的な条件に依らず、模型縮尺（代表寸法）によってほぼ一意的に定まっていた。これから、発生音の波長と模型寸法の比が模型縮尺に依らず一定に保たれるとすれば、5.1で述べた音響実験の相似則と同様の換算ができ、模型と原型の周波数の関係は(5-2)式となる。

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{n} \quad (5-2)$$

実験値から求めた無次元の周波数特性を(5-11)式の相似則による原型値への換算を行った結果を図-5.11に、(5-2)式の相似則による換算を行った結果を図-5.12にそれぞれ示した。

両図の比較から明らかなように、(5-2)式による換算がフルード数にかかわらず現地観測結果とほぼ一致した換算結果を与えるのに対して、(5-11)式による換算は卓越周波数に大きな相違を生じてしまっている。

卓越周波数付近の周波数特性を詳細に確認するために(5-2)式による換算結果を1/3オクターブ分析の形で図-5.13に示した。卓越周波数に数Hzの相違は見られるものの良好な再現を示している。図-5.14は、第3章で行った3種類の縮尺模型から原型値への換算を行った結果を実測値とともに示したものである。水理模型実験としてはやや大きな縮尺の範囲ではあるが、いずれの縮尺からも一致した再現結果が得られている。

以上から、周波数特性については(5.2)式を用いることによって、実用上十分な精度で水理模型実験結果から跳水時発生音の周波数特性を推定することが可能であると考えられる。

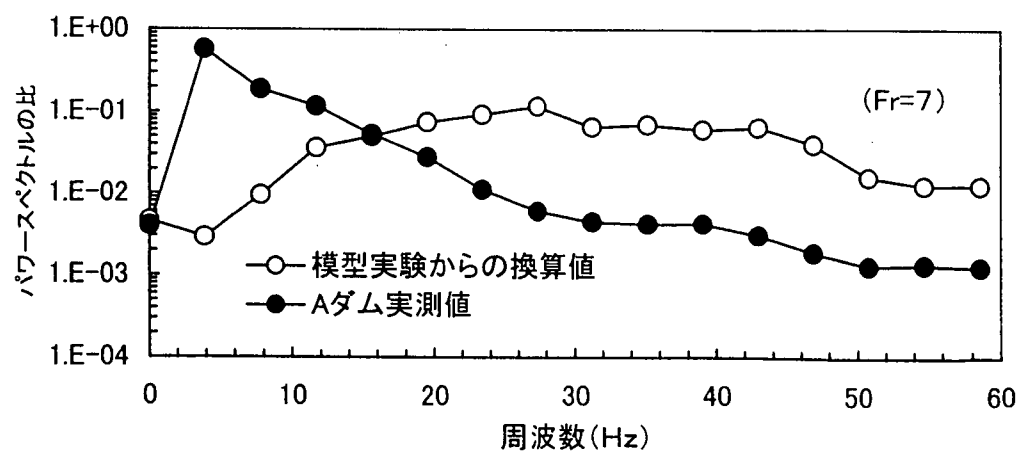
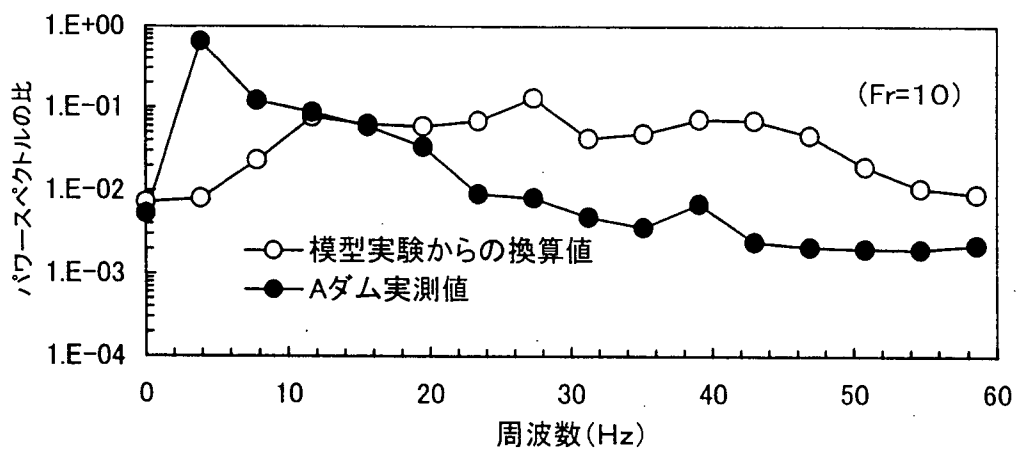
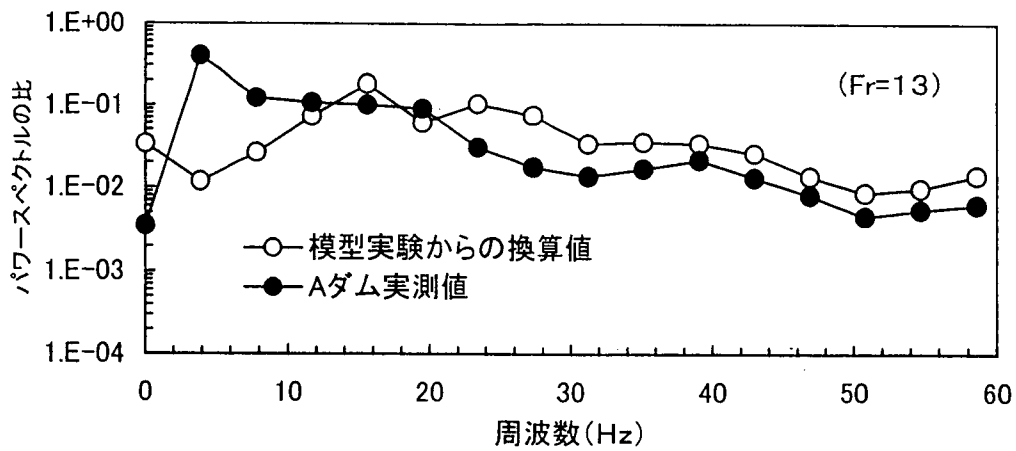


図-5.11 (5-11)式による周波数特性の換算結果

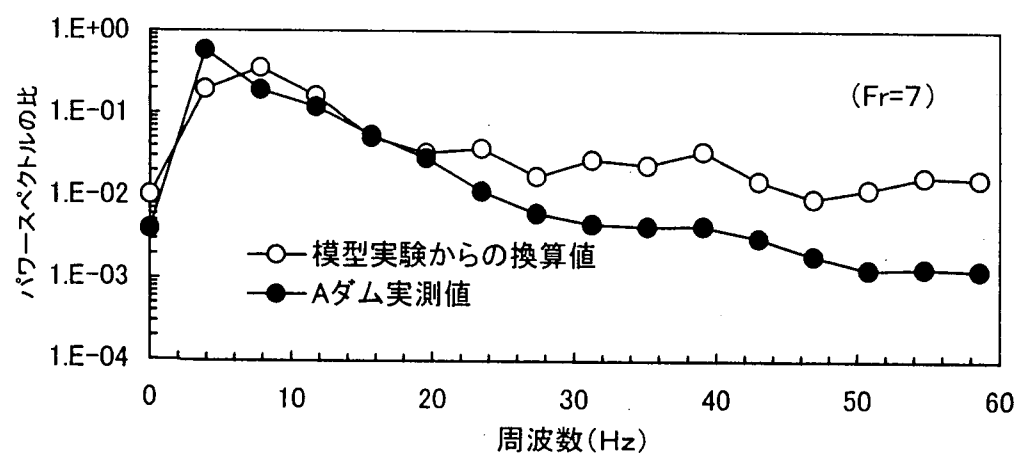
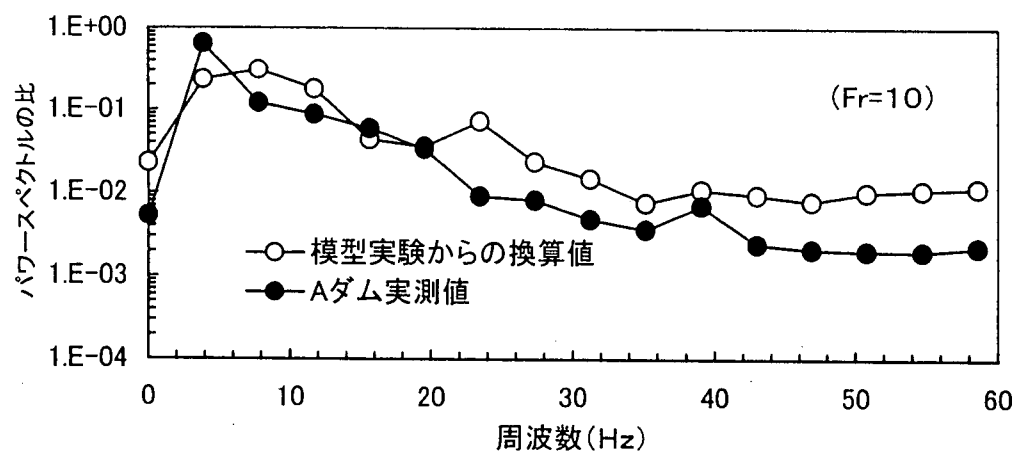
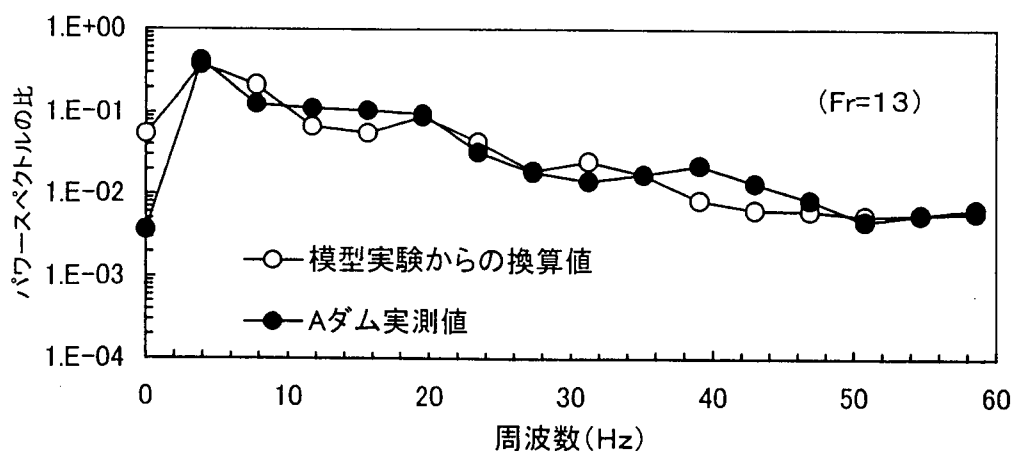


図-5.12 (5-2)式による周波数特性の換算結果

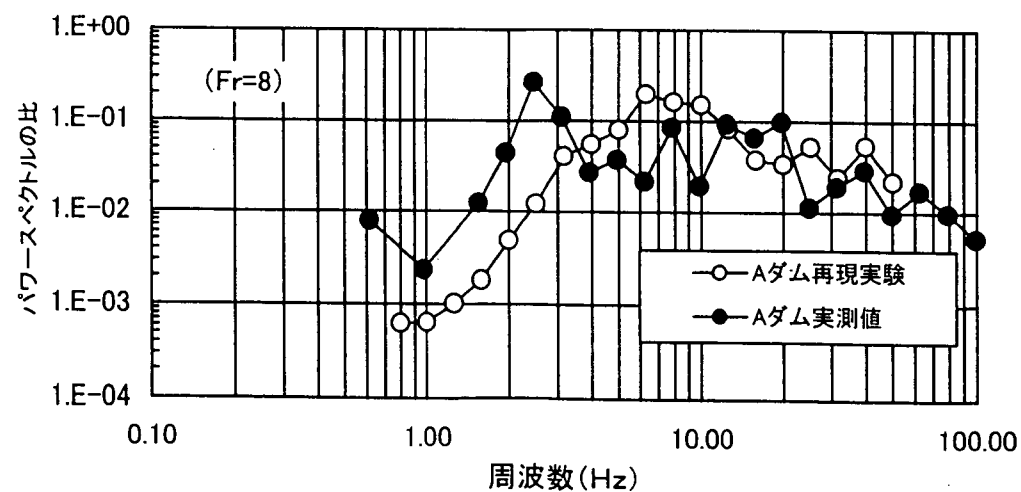
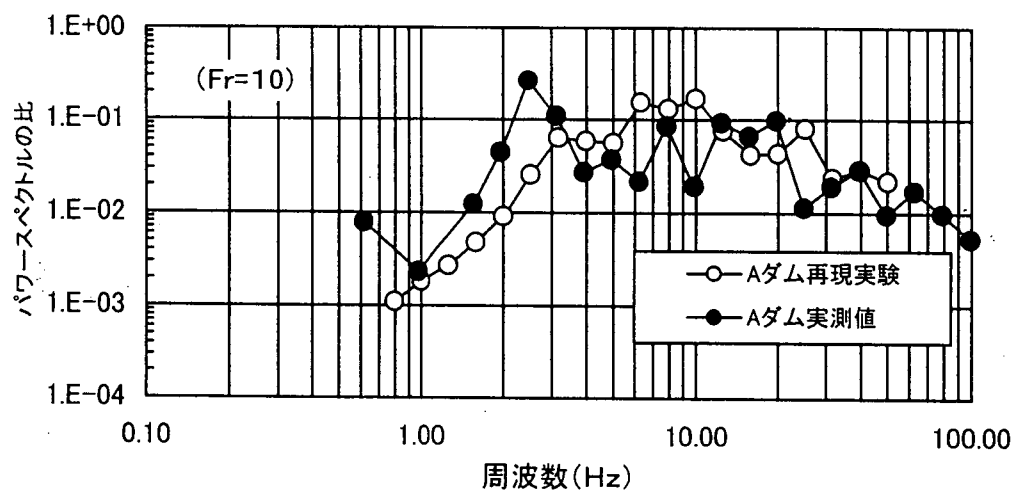
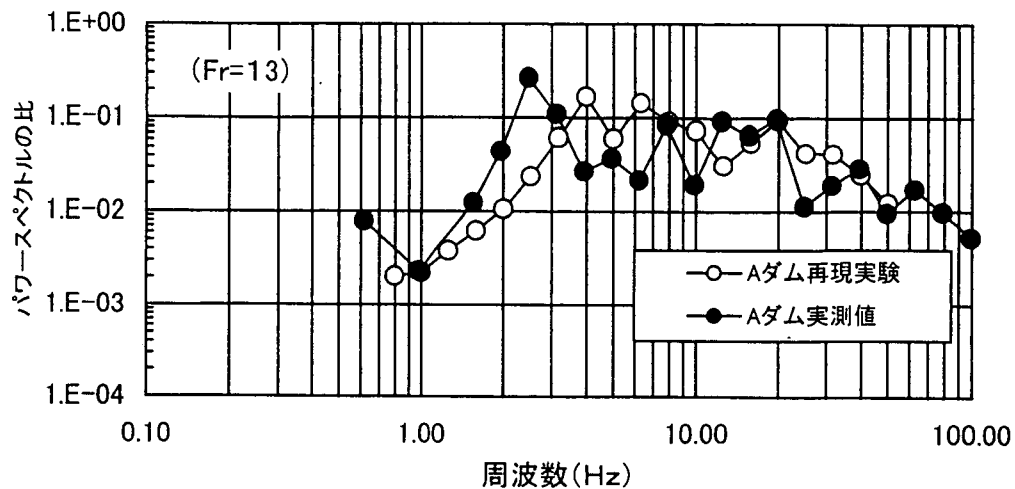


図-5.13 周波数特性の換算結果(1/3オクターブ分析)

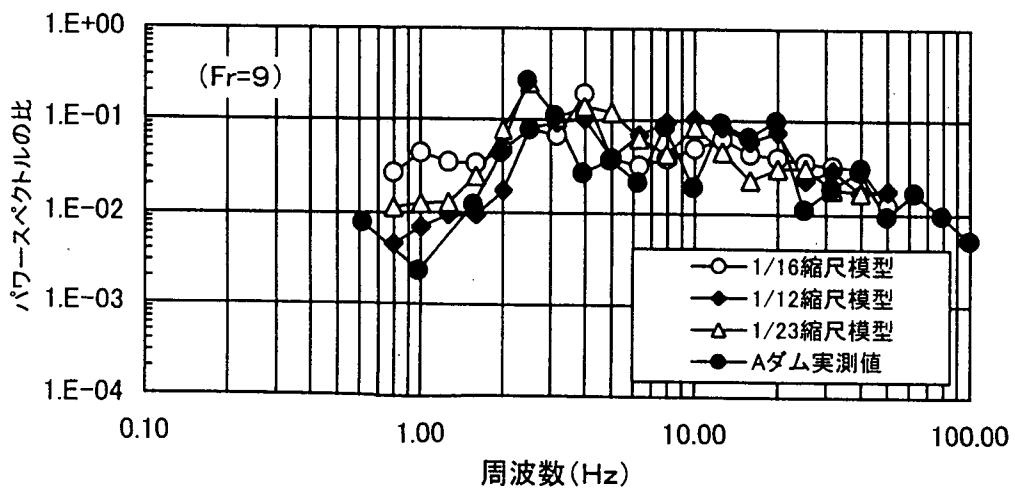
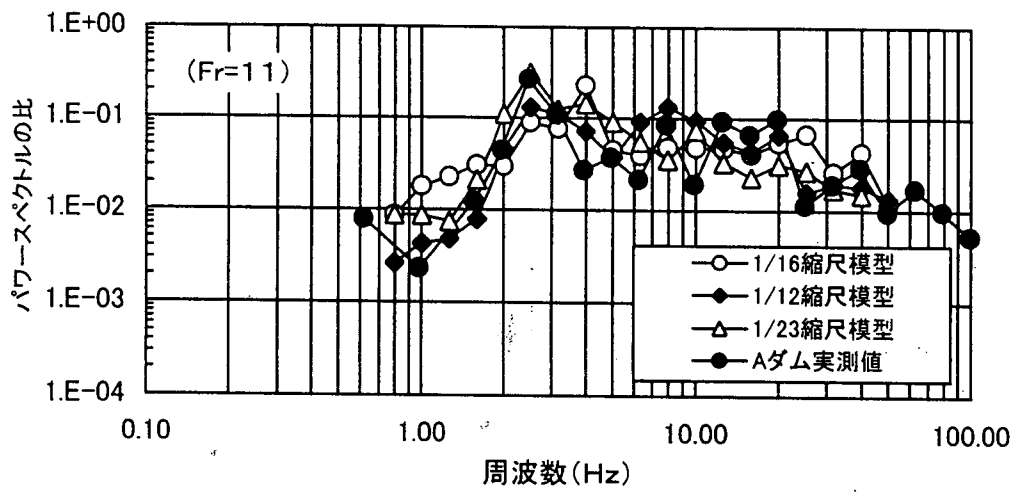
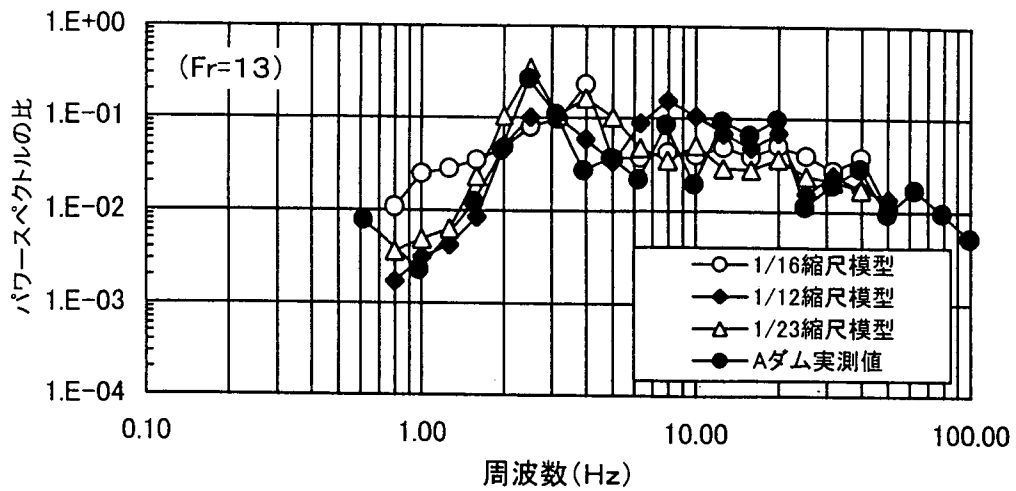


図-5.14 各縮尺模型からの換算結果(1/3オクターブ分析)

なお、周波数特性として無次元化されたパワースペクトルを、音響出力としてオーバーオール値のみを検討したが、音圧の絶対値で表現した周波数特性を知るためには、無次元化されたパワースペクトルにオーバーオール値を乗じればよく、当然のことながら、得られるパワースペクトルの分布形状自体は変化しない。

5.3 トンネル式放流設備における発生音の予測手法

前節では、跳水時の発生音（音源）の予測手法についての検討を行った。ここでは、この跳水時発生音のトンネル内での伝播特性およびトンネル出口において観測される音の予測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、原型との比較はできない。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討を行う。

5.3.1 トンネル内の伝播特性

最初に、トンネル内での音の伝播特性の換算手法について検討を行う。第4章で述べたように、次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関数形を示した。

伝達率

＝観測音／音源

＝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 (5-12)

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。したがって、この伝達率は音響実験で用いられる周波数換算式（5-2）による換算が可能なのである。図-5.15は、第4章で得られた伝達率の周波数特性のうち、1-3-b（0.5倍模型）、2-3-b（1倍模型）、3-3-b（1.5倍模型）のケースについて（5-2）式を用いて2倍模型への換算を行い、2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。

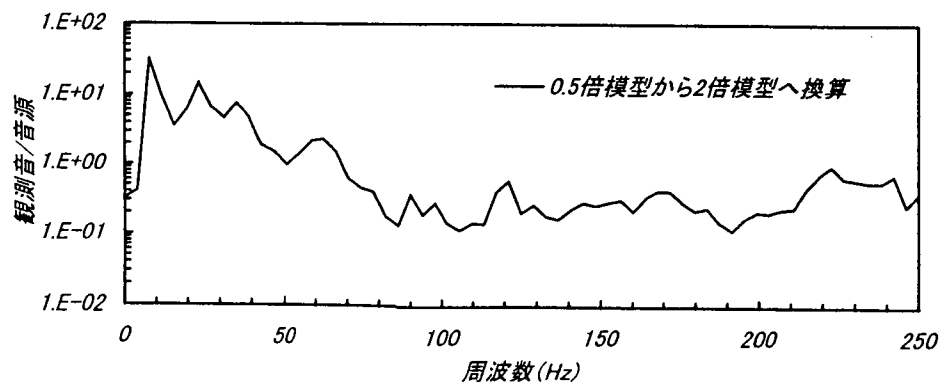
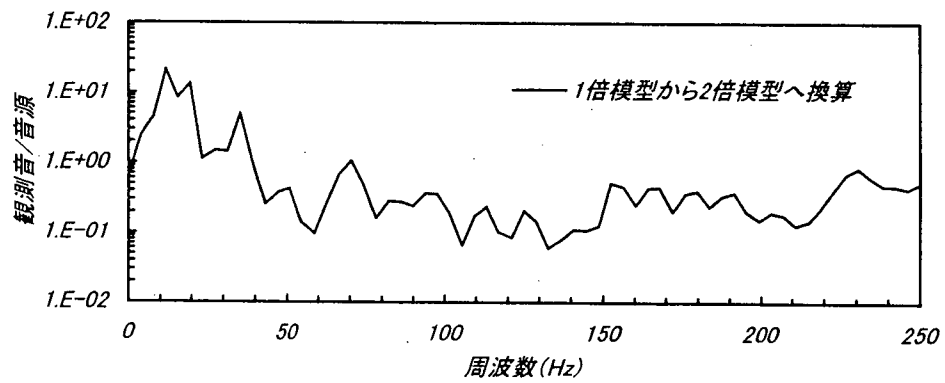
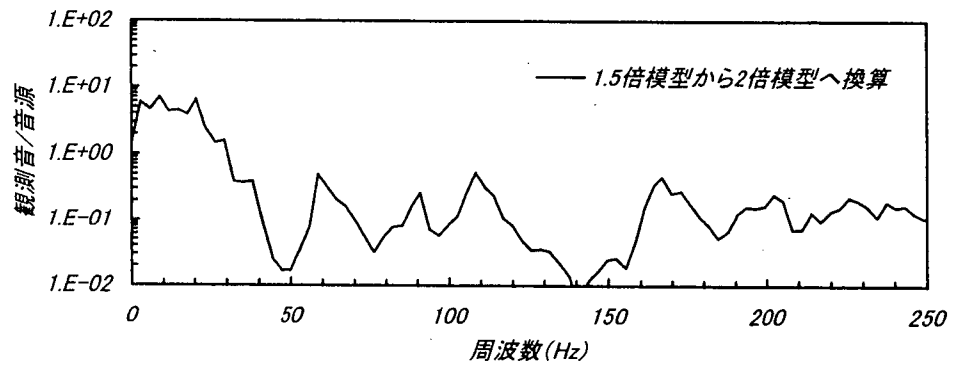
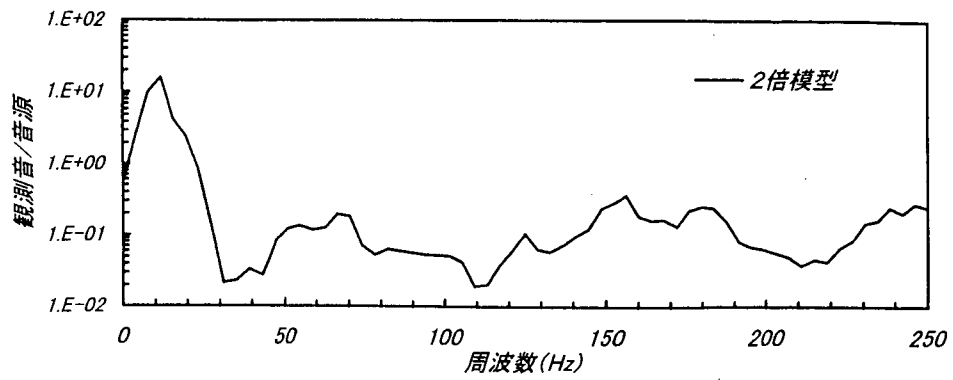


図-5.15 伝達率（観測音／音源）のパワースペクトルの換算

5.3.2 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、音源および伝達率についての換算方法が得られた。(5-12)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。

- ① 上方が開放された形状の模型で水理模型実験を行い、模型における音源の変換効率およびパワースペクトルを求める。
- ② 原型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原型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音源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(5-2)式の相似則を適用して音源の原型における無次元パワースペクトルを求める。これに②で求めた原型の音源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で求めた原型の音源のパワースペクトルに、④で求めた原型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原型値を求める。

ここでは、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-5.16は1-3-b (0.5倍模型)、2-3-b (1倍模型)、3-3-b (1.5倍模型) のケース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2倍模型値へ換算し、2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。

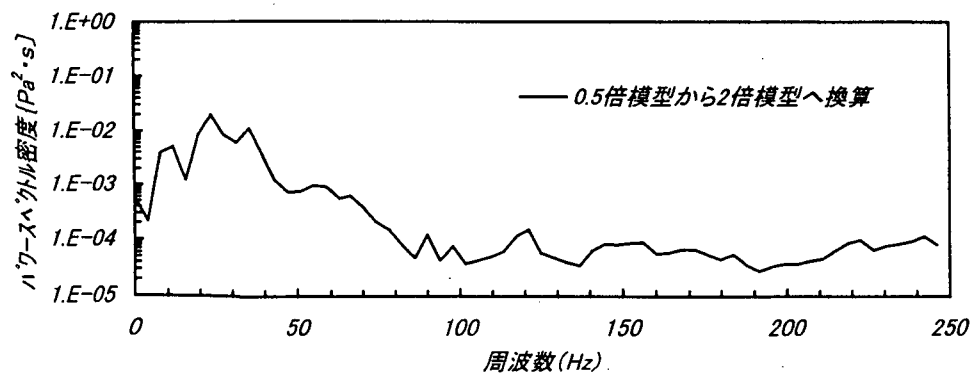
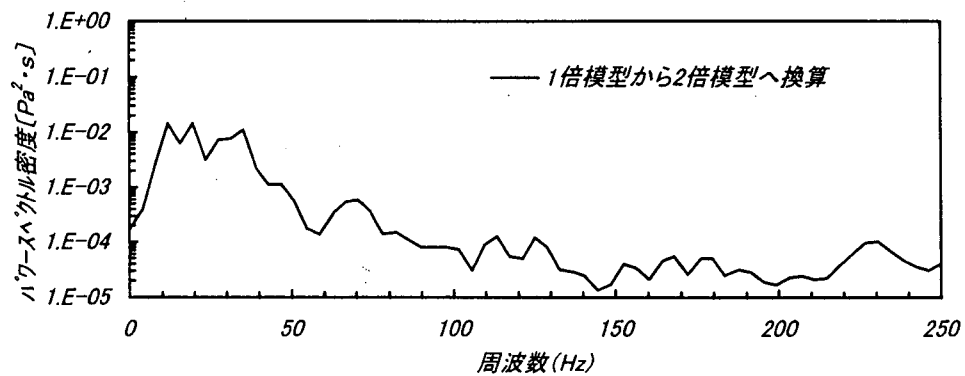
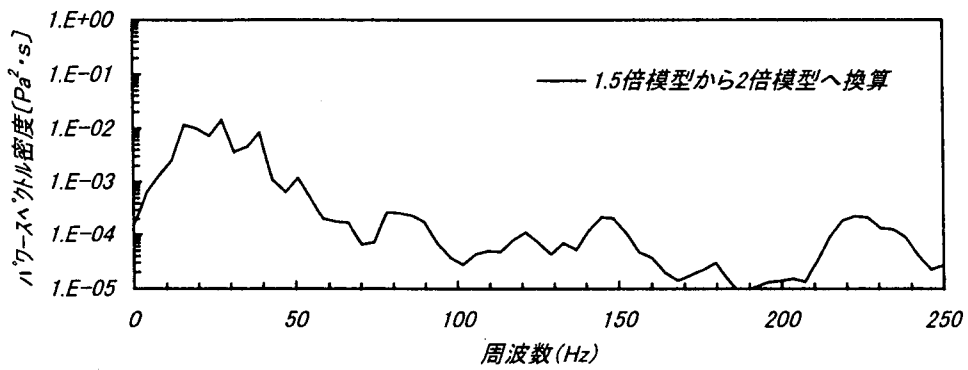
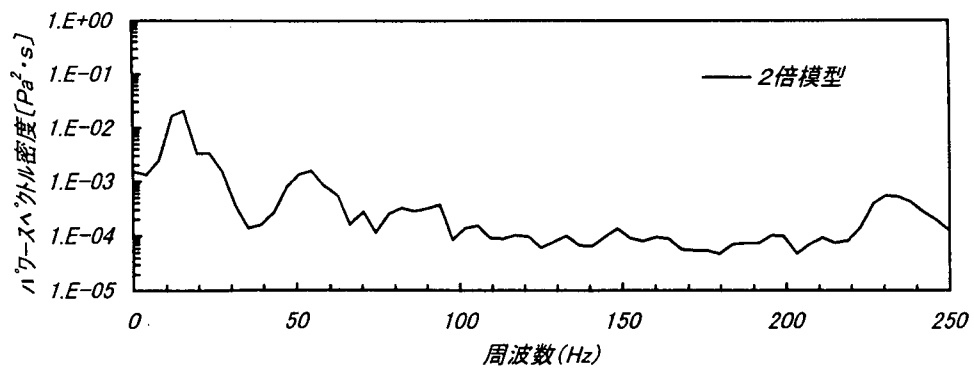


図-5.16 観測音（副ダム直下）のパワースペクトル密度の換算

第6章 天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備減勢工における発生音の予測

本章では、水理的な検討から得られた天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備減勢工の最終形状を対象として、第5章で検討した手法によってトンネル出口における観測音の推定を行う。

6.1 水理模型実験

天ヶ瀬ダムに新設されるトンネル式放流設備の減勢工形状は図-1.14に示すように馬蹄形断面となっている。これまでの検討は、減勢工の幅方向には一様な形状を仮定し、2次元模型を用いて行ってきたが、減勢工の幅方向の共鳴や馬蹄形をしていることの影響も完全に再現するためには3次元模型による実験が必要である。しかし、3次元模型とする場合、施設能力等の制約から模型縮尺は1/40と小さくならざるを得ず、そのため、発生する音圧も小さく、特に目的とするトンネル出口部における測定音圧は70～80dB程度と暗騒音に近いレベルになってしまう（表-6.3）。そこで、原型値の推定は大縮尺の2次元模型の実験値を用いて行うこととし、併せて、3次元模型を用いた水理実験も行い、比較的大きな音圧の得られるトンネル内の共鳴音について両者を比較し、2次元模型を用いることによるトンネル内の共鳴状況の差異が実用上無視し得る程度であるか、あるいは何らかの補正が必要であるかを確認することとした。

また、現時点では2次減勢工下流の河道水位条件が定められていないため、水理的な検討と同様に水位を変化させて実験を行っている。

6.1.1 実験模型および放流条件

(1) 2次元模型実験

図-6.1に実験に用いた模型を、図-6.2に音圧の測定位置を示した。縮尺は1/15.3である。（ただし、周波数特性の換算の際には1/16縮尺としている。）また、表-6.1に実験を行った流量、流速および水位条件を示した。これらの放流条件は、当施設の設計対象流量（700m³/s）および水位とは異なっているが、これまでの検討結果より、音源や観測音の周波数特性（オーバーオール値で除した無次元パワースペクトル）および伝達率については、大きく水理条件が異ならない限りほぼ一定の値を示すことが判明している。したがって、原型値の推定のうち周波数特性および伝達率についてはこれらの放流条件が

表-6.1 模型および原型における水理量の対応表

		流量 Q m ³	水路幅 B m	線流量 q m ³ /m	実流量 q' m ³ /(0.2m)	流速 v m/s	水位(O.P.) H m
設計流量	原型	700	22.6	31.0		26.2	67.2
	実験	0.764	1.48	7.39	0.104	6.7	
実験流量	原型	480	22.6	21.2		27.8	72.6
	模型	0.524	1.48	0.355	0.071	7.1	
実験流量	原型	419	22.6	18.6		25.9	66.1
	模型	0.458	1.48	0.31	0.062	6.6	
実験流量	原型	345	22.6	15.3		22.6	56.2
	模型	0.377	1.48	0.26	0.051	5.8	

注) 1. 実験流量とは実際に実験を行った流量およびその原型への換算値を示したものである。

2. 実流量q'は実際の模型において流した流量（模型の水路幅は20cm）を示したものである。

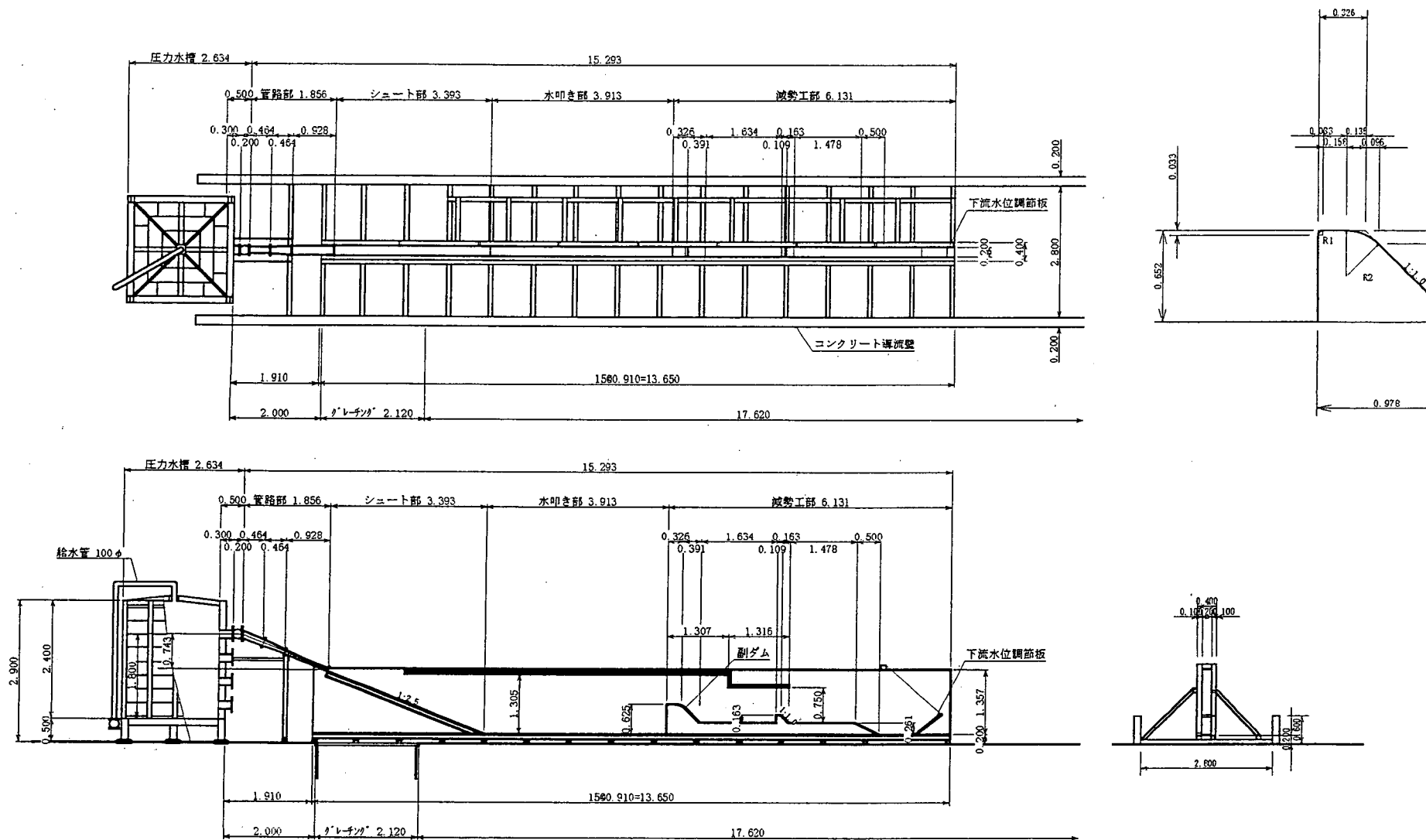


図-6.1 天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備減勢工再現実験模型

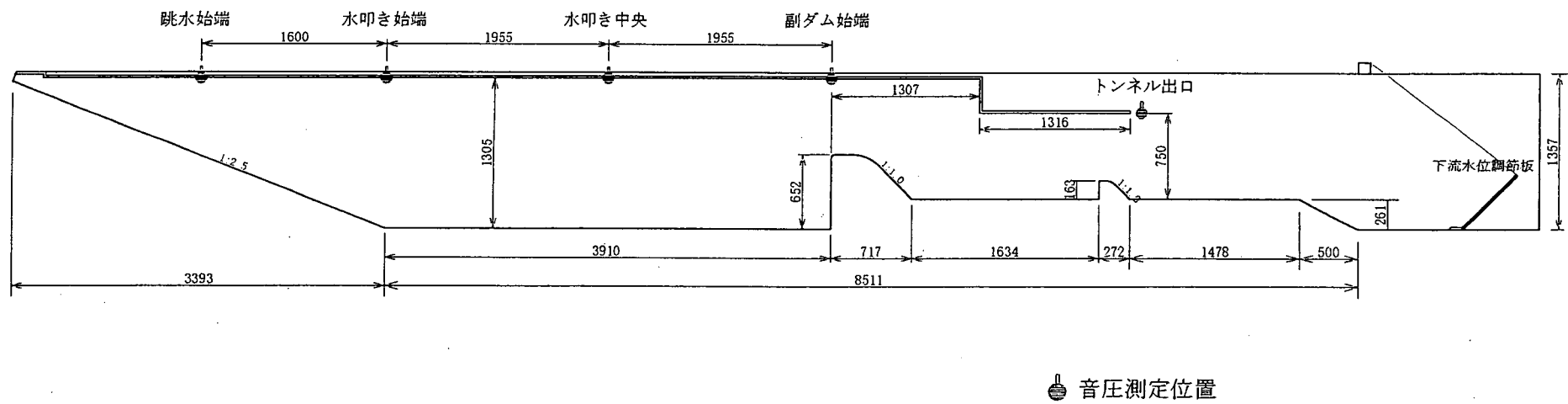


図-6.2 音圧測定位置図

ら得られる値を用いることとし、音圧の絶対値、すなわち音響出力の推定に必要な流入エネルギーの算定に際しては原型の設計放流条件を用いることとした。

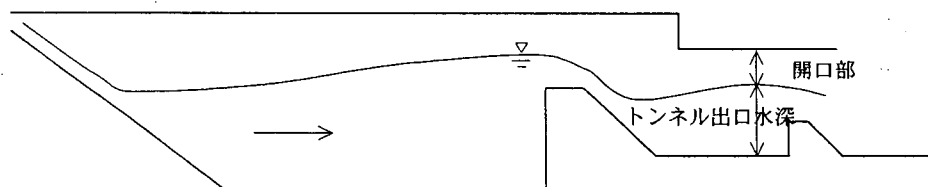
また、下流水位の変化を想定して、トンネル出口付近における空き断面の高さが平均水位時で0.12、0.22、0.33m（原型値で1.8、3.4、5.0m）となるように模型下流の水位調節板を調整した。実験時の各流量における水深および空き断面高さを表-6.2に示した。

なお、本章で用いた模型形状と第3章で用いた模型形状の差は副ダム周辺だけであり、跳水始端部にあると考えられる音源については、第3章の実験結果をそのまま用いることが可能である。表-6.1の流量条件に対応する音源についての実験は、表-3.1に示した実験ケース3-4-a～cである。

表-6.2 トンネル出口水位計測結果

流量 (m ³ /s)	開口部	トンネル出口水深(m)		開口部高さ(m)	
		最高	平均	最高	平均
0.070	小	0.69	0.63	0.06	0.12
	中	0.53	0.53	0.22	0.22
	大	0.42	0.42	0.33	0.33
0.060	小	0.68	0.63	0.07	0.12
	中	0.61	0.54	0.14	0.21
	大	0.51	0.42	0.24	0.33
0.050	小	0.65	0.62	0.10	0.13
	中	0.58	0.54	0.17	0.21
	大	0.43	0.40	0.32	0.35

注)測定位置は以下のとおり



(2) 3次元模型実験

図-1.14に示したトンネル式放流設備の減勢工を完全に再現した縮尺1/40模型を用いた。これは水理検討に用いた模型であり、詳細は「土木研究所資料第3623号 天ヶ瀬ダム水理模型実験」（平成11年3月水工水資源研究室）第5章に記載した。実験を行った放流条件を表-6.3に示した。測点は2次元

表-6.3 3次元模型実験流量条件及び音圧測定結果

放流量 (m ³ /s)	貯水位 OP.(m)	ゲート開度 (m)	河道水位 OP.(m)	音圧 (Pa rms)		音圧レベル (dB)	
				跳水始端	トンネル出口	跳水始端	トンネル出口
200	67.10	1.52	24.0	0.543	0.081	88.7	72.2
400	67.10	3.12	24.0	1.028	0.119	94.2	75.5
600	67.10	4.32	24.0	1.449	0.150	97.2	77.5
700	67.10	4.72	22.8	1.677	0.184	98.5	79.3
700	67.10	4.72	24.0	1.704	0.173	98.6	78.8
863	78.50	4.80	24.0	2.351	0.182	101.4	79.2

模型と同様トンネル内の跳水始端部直上およびトンネル出口（図-6.2）である。

6.1.2 実験結果

(1) 2次元模型実験

トンネル出口およびトンネル内始端部直上における音圧のオーバーオール値を表-6.4に、周波数特性を図-6.3～8に示した。図は、いずれも上段がパワースペクトル密度を下段がオーバーオール値で無次元化した値を示している。

表-6.4 2次元模型実験音圧測定結果

流量 (m^3/s)	開口部	開口部 高さ(m)	音圧 (Pa)		音圧レベル (dB)	
			跳水始端	トンネル出口	跳水始端	トンネル出口
0.071	小	0.12	11.698	0.811	115.3	92.2
	中	0.22	11.590	1.008	115.3	94.0
	大	0.33	12.316	1.164	115.8	95.3
0.062	小	0.12	8.309	0.663	112.4	90.4
	中	0.21	8.902	0.822	113.0	92.3
	大	0.33	8.977	1.017	113.0	94.1
0.051	小	0.13	5.089	0.482	108.1	87.6
	中	0.21	5.617	0.588	109.0	89.4
	大	0.35	6.046	0.787	109.6	91.9

まず、表-6.4および図-6.3～5に示したトンネル出口における測定値について見ると、音圧の絶対値は空き断面の大きさによって多少変化し、空き断面が小さいほど、すなわち水位が高いほど小さくなることからわかる。無次元化した周波数特性は水位に依らずほぼ同一の分布を示しており、空き断面の減少による低減傾向は全周波数帯に渡っていることがわかる。図-6.6は、空き断面を一定とした場合の流量に対する音圧の変化を示したものである。流量の増加とともに音圧は大きくなる傾向を示しているが、その分布形状はほぼ同一である。すなわち、第4章における検討と同様、最終形状における観測音の周波数特性も水理的な条件に依らずほぼ一定となることが確認された。したがって、以降の原型値の推定は、図-6.3に示した模型流量 $0.071\text{m}^3/\text{s}$ のトンネル出口測定音の周波数特性を用いて行うものとする。

次に、表-6.4および図-6.7～8に示したトンネル内跳水始端直上における測定値を見ると、周波数特性および音圧の絶対値は出口の空き断面の大きさにはほとんど影響されていないことがわかる。また、図-6.8は空き断面を一定とした場合の流量に対する音圧の変化を示したものである。こちらはトンネル出口と同様に流量の増加とともに音圧は大きくなる傾向を示しており、その分布形状はほぼ同一である。なお、このトンネル内の測定音は、音源、すなわち、第3章で検討を行った天井を設けない場合の音とは異なり、トンネル内における共鳴を含んだ音である。また、目的とするトンネル出口における原型値の推定に直接必要なデータではないが、前述のようにトンネル内における共鳴状況を3次元模型と比較することを目的として測定を行っている。

なお、音源については、第3章の検討結果に示したとおりであり、周波数特性は流量条件に依らず一定となる。

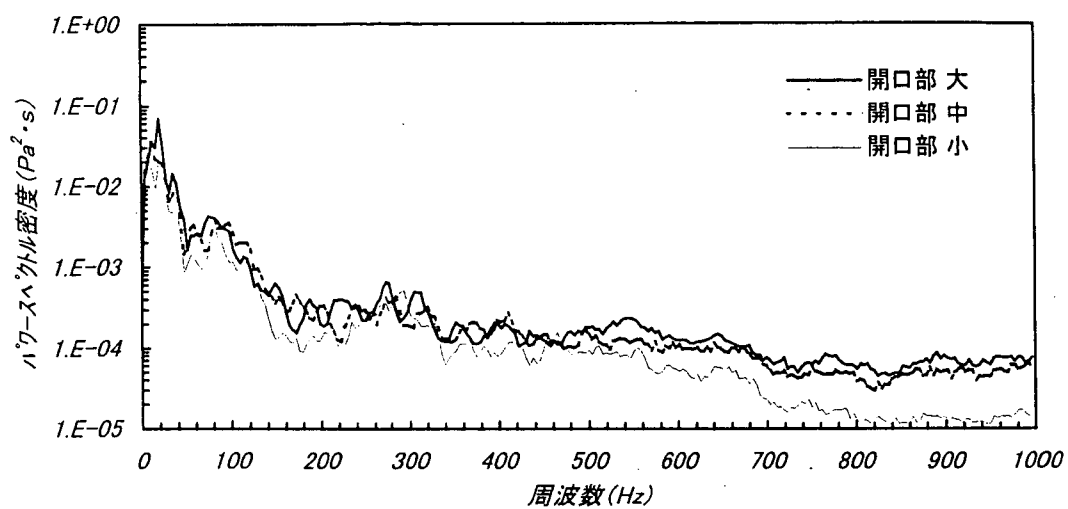


図-6.3a トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 流量：0.071m³/s

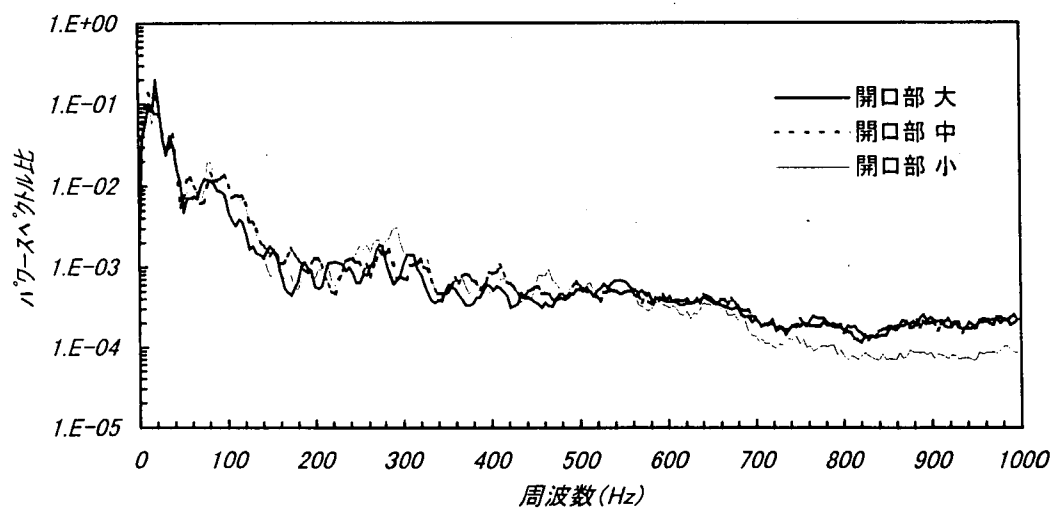


図-6.3b トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 流量：0.071m³/s

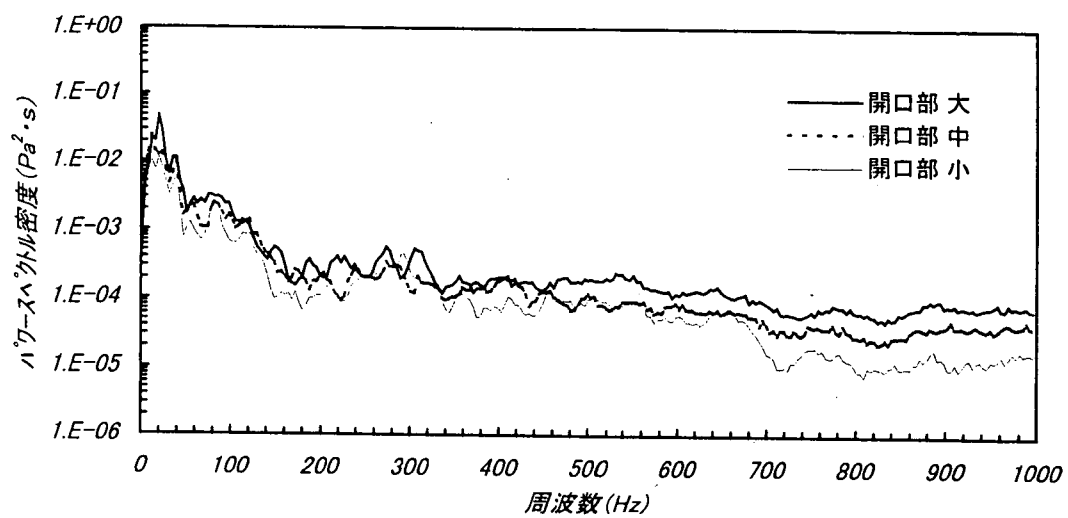


図-6.4a トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$

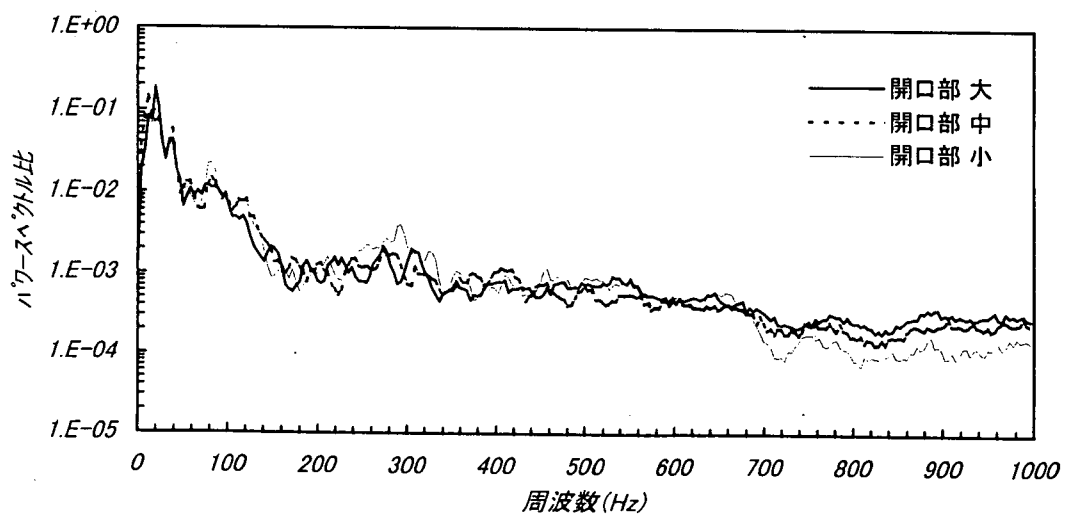


図-6.4b トンネル出口観測音のパワースペクトル (模型値) 流量: $0.060 \text{ m}^3/\text{s}$

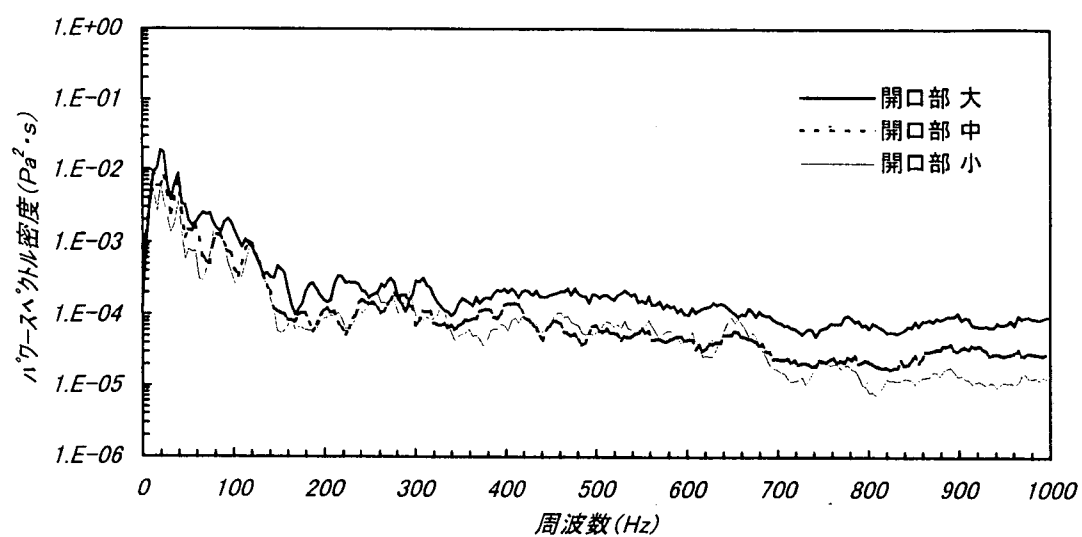


図-6.5a トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 流量：0.050 m³/s

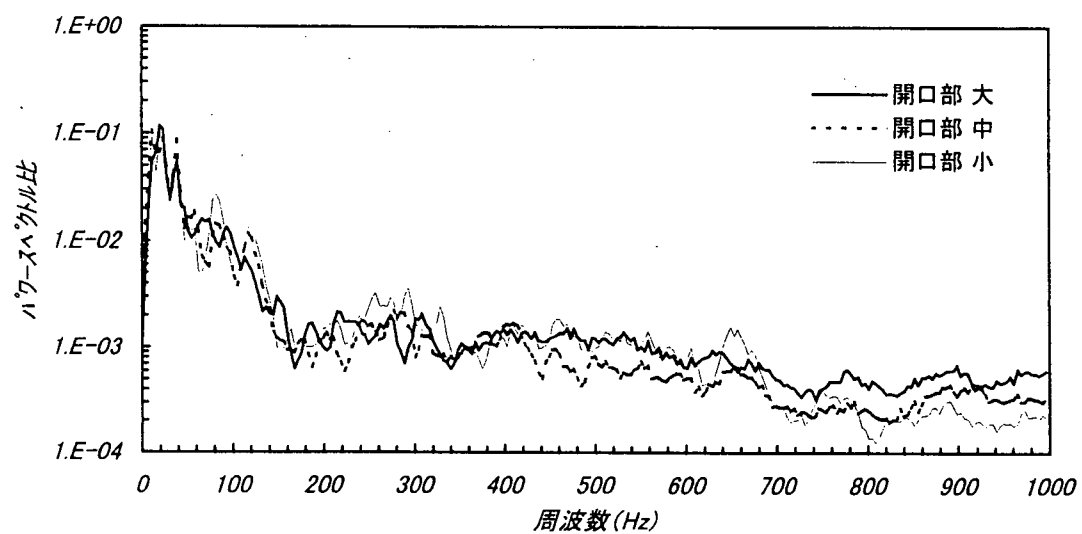


図-6.5b トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 流量：0.050 m³/s

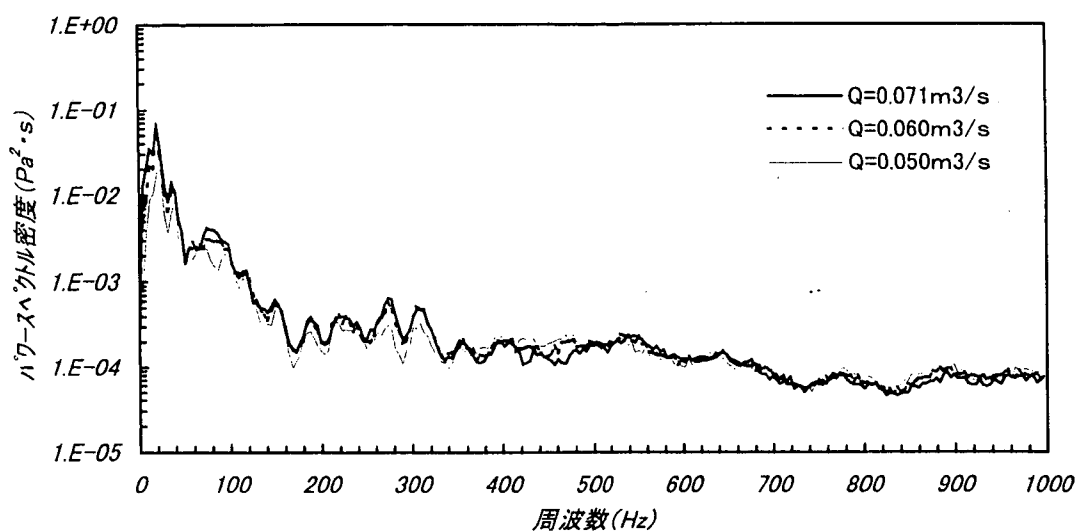


図-6.6a トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 開口部大

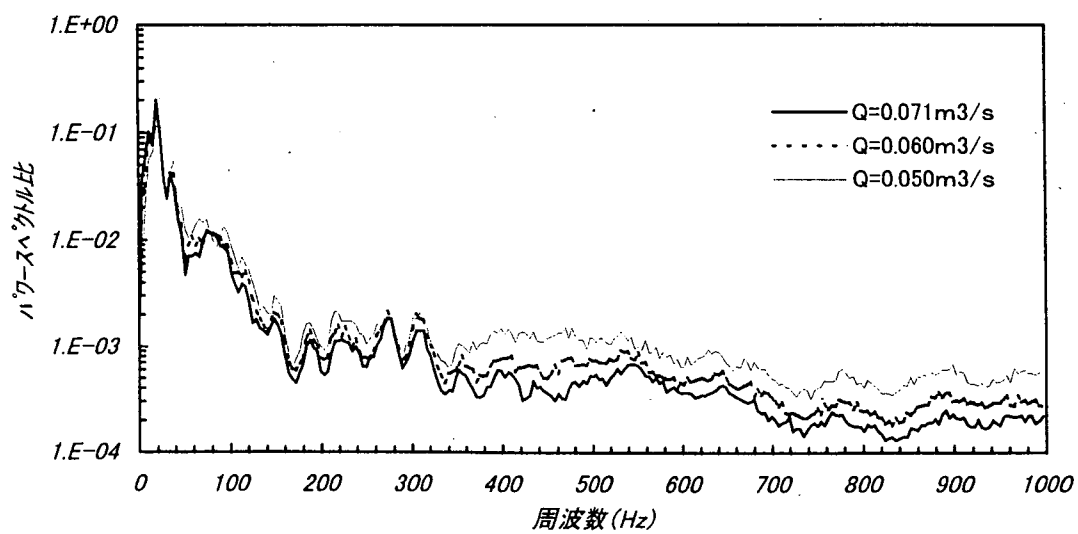


図-6.6b トンネル出口観測音のパワースペクトル（模型値） 開口部大

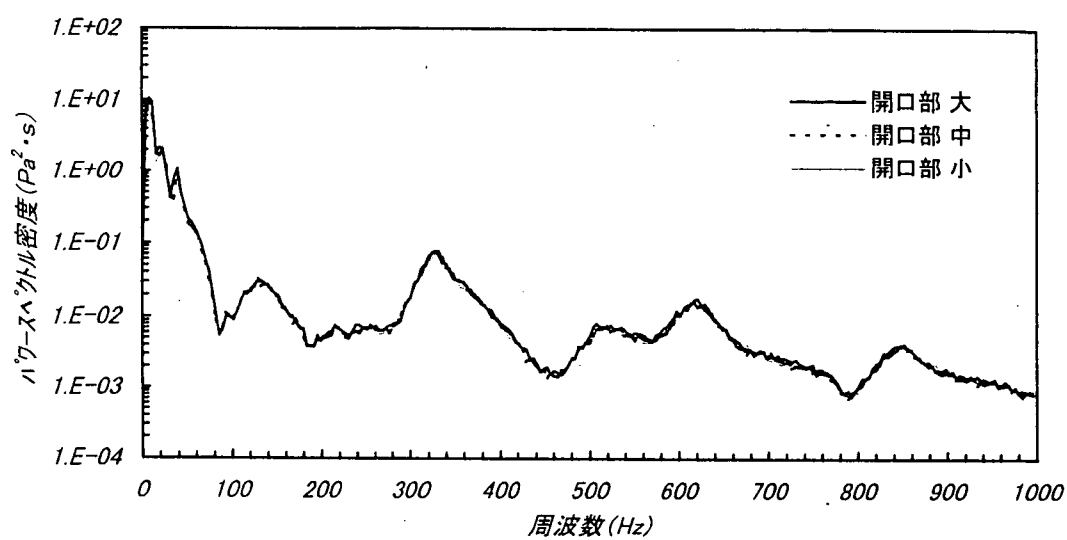


図-6.7a トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル (模型値)
流量 : $0.071 \text{ m}^3/\text{s}$

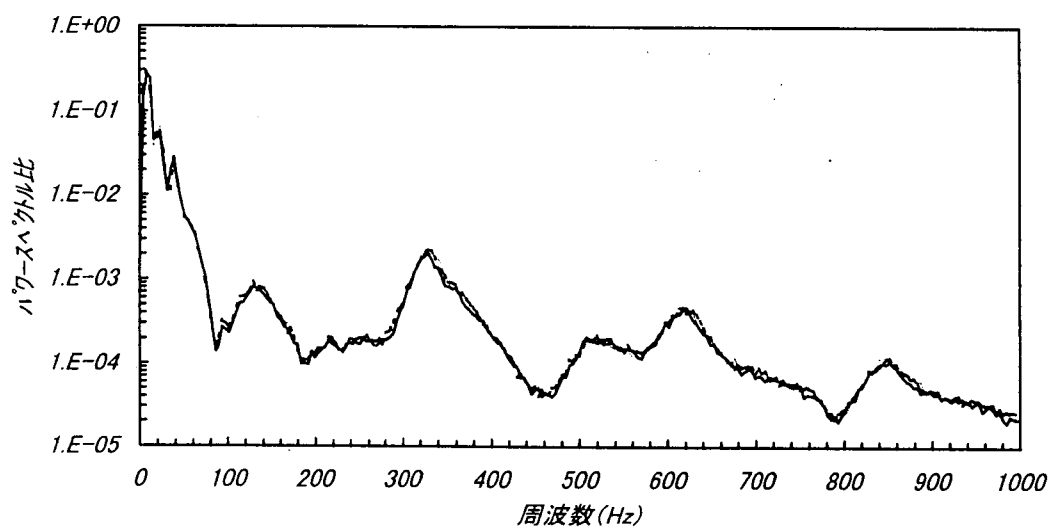


図-6.7b トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル (模型値)
流量 : $0.071 \text{ m}^3/\text{s}$

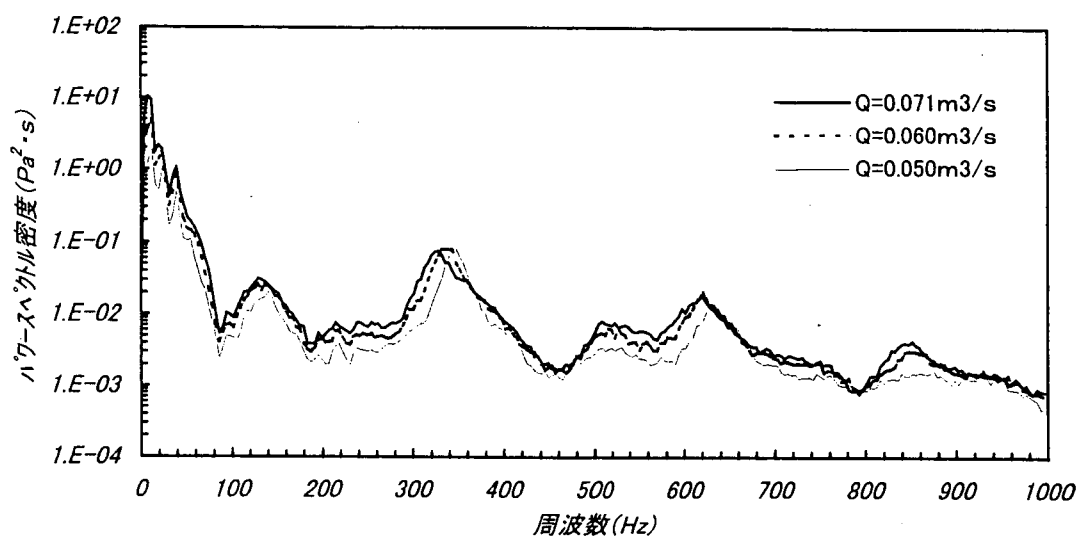


図-6.8a トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル（模型値） 開口部大

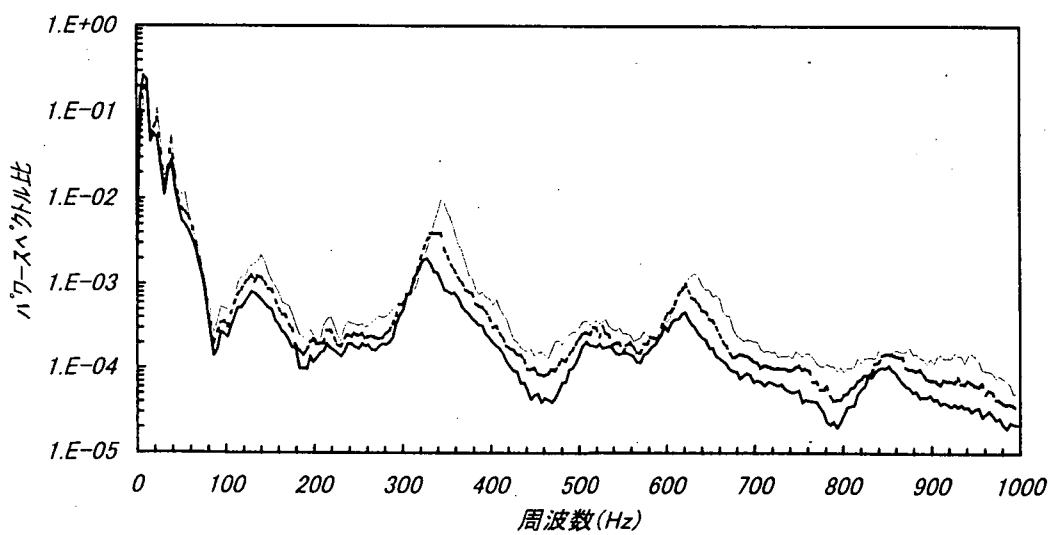


図-6.8b トンネル内部跳水始端観測音のパワースペクトル（模型値） 開口部大

(2) 3次元模型実験結果

3次元模型におけるトンネル内跳水始端部直上およびトンネル出口における測定音の音圧のオーバーオール値を表-6.3に、パワースペクトル密度およびオーバーオール値による無次元パワースペクトルを図-6.9~10に示した。トンネル内、出口ともにそれぞれ流量に依らない周波数特性を持ち、また、音圧の絶対値は流量の増加とともに大きくなっている。ただし、トンネル出口における測定音は、トンネル内の測定音に比べ低周波における卓越周波数がやや不明瞭になっている。

(3) 2次元模型と3次元模型のトンネル内測定音の周波数特性の違い

2次元模型と3次元模型のトンネル内における共鳴現象の違いを確認するために、トンネル内跳水始端部直上における測定音の周波数特性について比較を行う。図-6.11に3次元模型の測定値を(5-2)式を用いて2次元模型の縮尺1/16に換算した値と2次元模型の測定値を示した。図によれば、卓越周波数周辺の低周波数帯の分布形状はほぼ一致しているものの、高周波数帯の分布形状に相違が見られる。卓越周波数および低周波数帯の分布形状については、これらがトンネルの空き断面における共鳴のうち流下方向の共鳴に対応しているため両者の違いが小さいものと考えられる。一方、2次元模型では再現されていない横断方向の空き断面形状に影響を受けると考えられる周波数の高い領域には相違が生じているものと考えられる。しかし、両者の相違はわずかであり、特に、発生音のほとんどを占めると考えられる卓越周波数およびその周辺の分布形状はほぼ一致しており、2次元模型による周波数特性をそのまま用いて推定を行っても実用上差し支えないものと判断される。

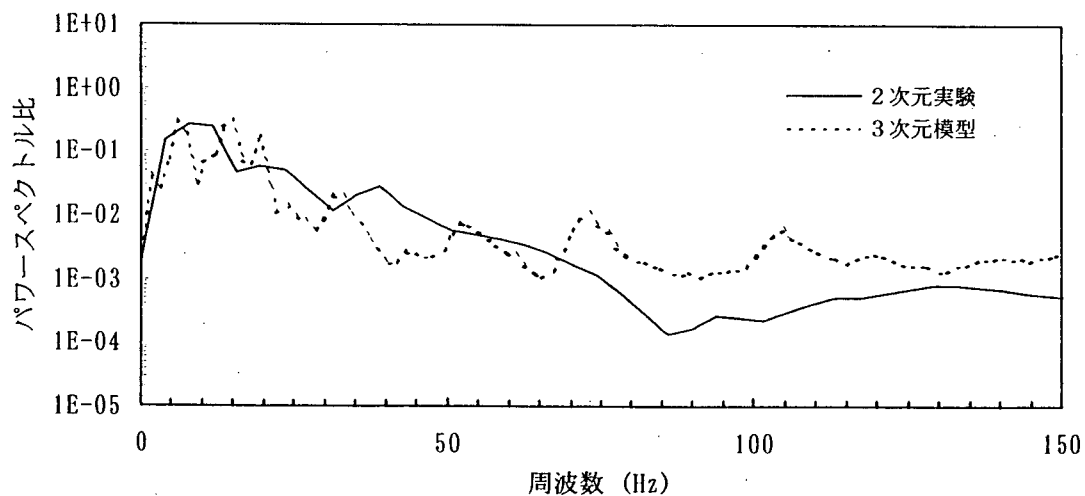


図-6.11 3次元模型と2次元模型のトンネル内測定音の周波数特性

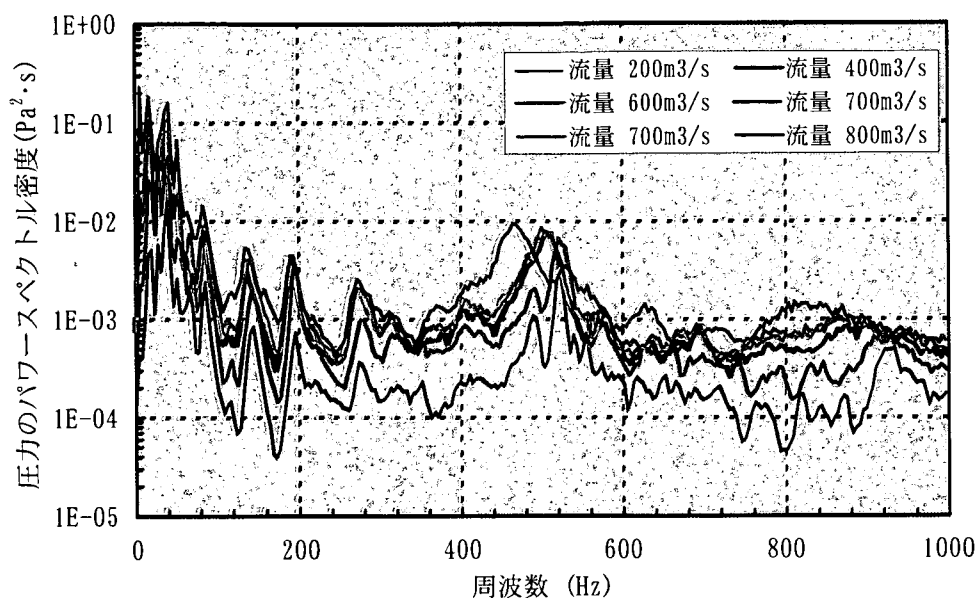


図-6.9a 3次元模型におけるトンネル内測定音のパワースペクトル密度

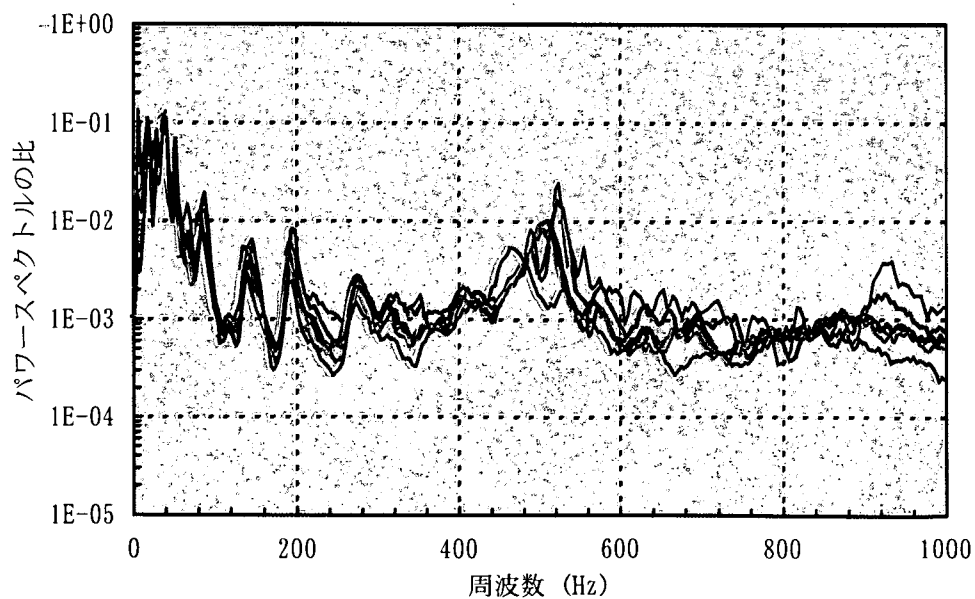


図-6.9b 3次元模型におけるトンネル内測定音の無次元パワースペクトル

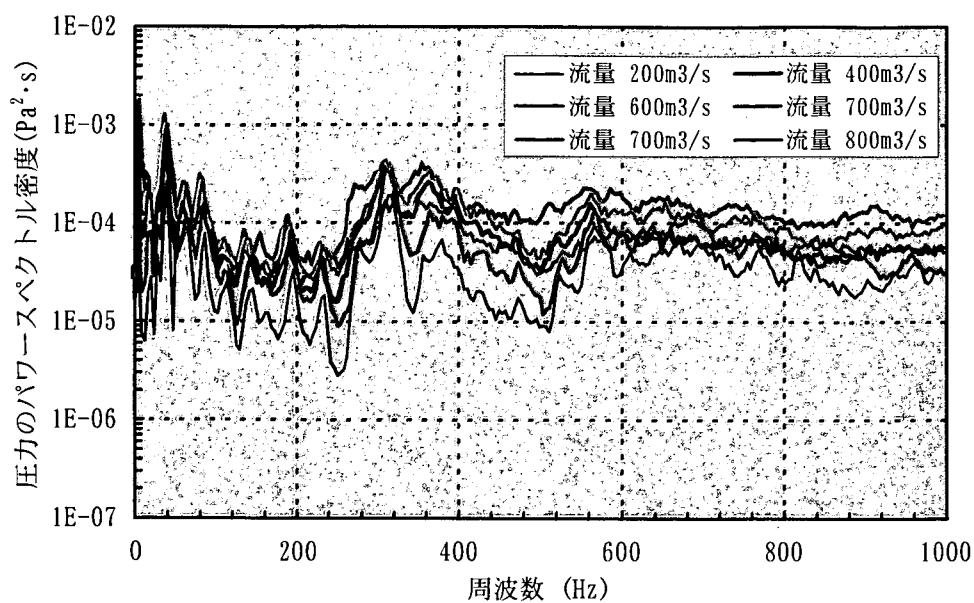


図-6.10a 3次元模型におけるトンネル出口測定音のパワースペクトル密度

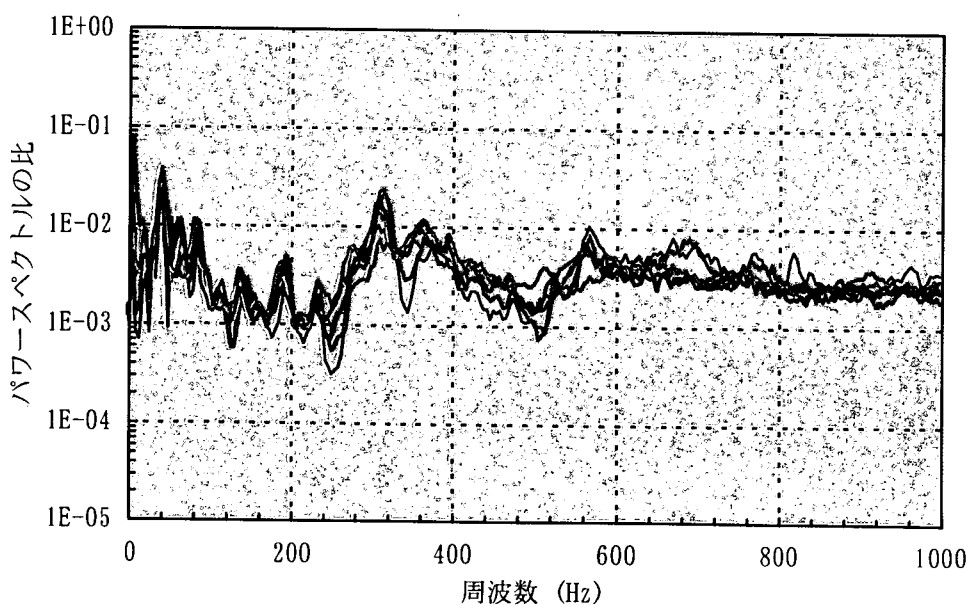


図-6.10b 3次元模型におけるトンネル出口測定音の無次元パワースペクトル

6.2 音源の推定

実験結果によれば発生音は流入エネルギーに比例して増加する。ここでは、まず、以下に示す施設の設計対象の放流条件について推定を行う。

水位：発電最低水位 O.P 67.7m

流量：700m³/s

6.2.1 音響出力の推定

(1) 流入エネルギー

流入エネルギーは次式で与えられる。

$$E = \frac{\rho_w q v^2}{2} \quad (6-1)$$

ここに

$$\rho_w = 1.0 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$$

$$q = Q/B = 700 (\text{m}^3/\text{s}) / 22.6 (\text{m}) = 31.0 (\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m})$$

$$v = c \sqrt{2g(H_r - H_i)} 0.9 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times (67.1 - 24)} = 26.2 (\text{m/s})$$

H_r ：貯水位、 H_i ：水脈の減勢池への着水標高（=24m、3次元模型実験において測定）

したがって

$$E = 1.06 \times 10^7 (\text{J/s} \cdot \text{m})$$

(2) 音源出力

流入エネルギーと音源出力の関係は次式で与えられる。

$$W = \alpha E \quad (6-2)$$

変換効率としては、実験では程度となっているので、これに若干の安全を見込んで

$$\alpha = 7.0 \times 10^{-6}$$

とする。なお、この値はAダムにおける実測の変換効率の最大値でもある。これを用いて音響出力は以下のとおり計算される。

$$W = 7.0 \times 10^{-6} \times 1.06 \times 10^7 (\text{J/s} \cdot \text{m}) = 74.2 (\text{J/s} \cdot \text{m})$$

また、実験上の音源測定位置および伝達率が始端直上1.0mで定義されているので、この地点における音の強さ I に換算する必要がある。無限線音源を仮定すると、音源から $r(\text{m})$ 離れた地点における音の強さと音源出力の関係は次式で与えられる。

$$W = 2 \pi r I = 2 \pi r \frac{p^2}{\rho_a c} \quad (6-3)$$

ここに

$$r = 1(\text{m}) \times 15.3 = 15.3(\text{m}) \quad : \text{音源からの距離}$$

$$\rho_a = 1.205 (\text{kg/m}^3) \quad : \text{空気の密度}$$

$$c = 343 (\text{m/s}) \quad : \text{音速}$$

したがって

$$I = \frac{W}{2\pi r} = \frac{74.2}{2 \times 3.14159 \times 15.3} = 0.772 (\text{J/s/m}^2)$$

音圧で表すと

$$p = \sqrt{I \rho_a c} = \sqrt{0.772 \times 1.205 \times 343} = 17.9 (\text{Pa}) \quad (6-4)$$

音圧レベルで表すと

$$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0) = 20 \times \log_{10}\{17.8/(2 \times 10^{-5})\} = 119 (\text{dB}) \quad (6-5)$$

6.2.2 音源の周波数特性

次に、音源の周波数特性を求める。模型実験により得られた周波数特性を図-6.12aに示した。オーバーオール値で無次元したパワースペクトルを図-6.12bに示した。第5章での検討結果より、以下に示す式による原型への換算が可能である。

$$\frac{f_p}{f_m} = \frac{1}{n} \quad (6-6)$$

図-6.12b示す周波数特性を原型における周波数特性に換算した結果を図-6.13に示した。これと(6-4)式で得られた音圧のオーバーオール値を用いて原型における音源のパワースペクトル密度を求めると図-6.14となる。

6.3 トンネル式放流設備における発生音の推定

6.3.1 伝播特性

図-6.3aに示した観測音のパワースペクトル密度を図-6.12aに示した音源のパワースペクトル密度で周波数毎に除すれば図-6.15に示す伝達率が得られる。この模型における伝達率を(5-12)式を用いて原型の伝達率に換算すると図-6.16が得られる。なお、低周波数帯（原型値で4 Hz以下の範囲）では伝達率が10~30と非常に大きな値となっている。

いま、トンネル内における伝播特性が非線形性を持たない、すなわち、ある周波数の音を考えた場合、伝播時にその音が減衰することはあっても、他の周波数の音に変化することはない、とすれば、各周波数成分とも始端部において発生する音響エネルギーを超えたエネルギーがトンネル出口から放出することとはあり得ない。したがって、伝達率には取り得る最大値が存在する。

音源における着目する周波数成分の単位幅当たりの音響エネルギー（出力）は(6-3)式と同様に次式で与えられる。

$$W_i = 2\pi r I_i \quad (6-7)$$

ここに

W_i : 単位幅当たりの音響出力 [w/m]

I_i : 音源から r m 離れた位置における音の強さ [w/m²]

一方、トンネル出口を通して外部に放出される単位幅当たりの音響エネルギーはトンネル出口におけ

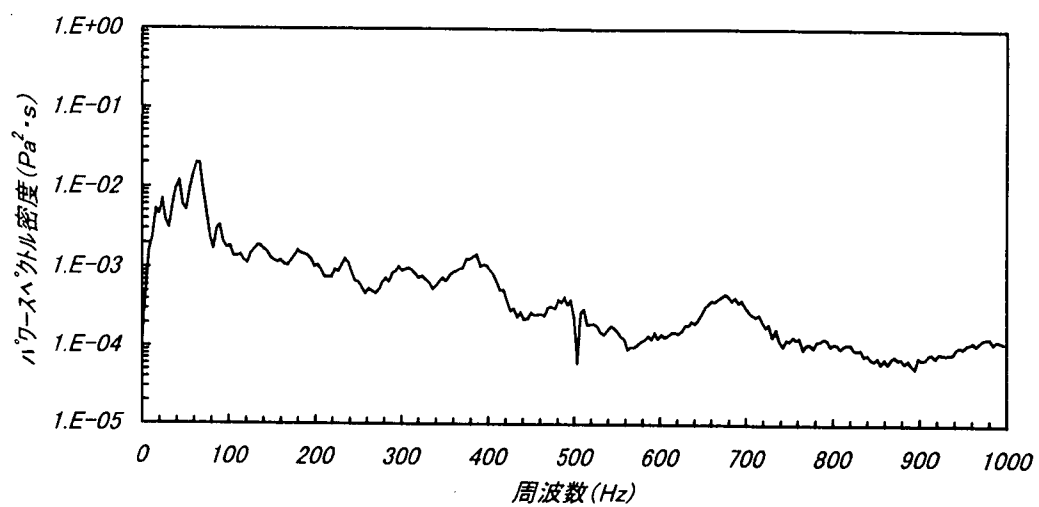


図-6.12a 音源のパワースペクトル (模型値)

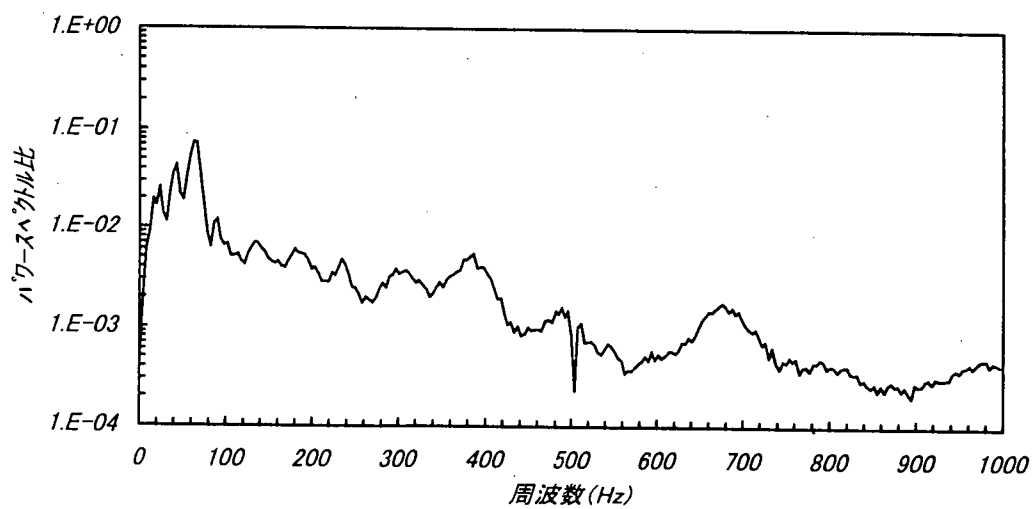


図-6.12b 音源のパワースペクトル (模型値)

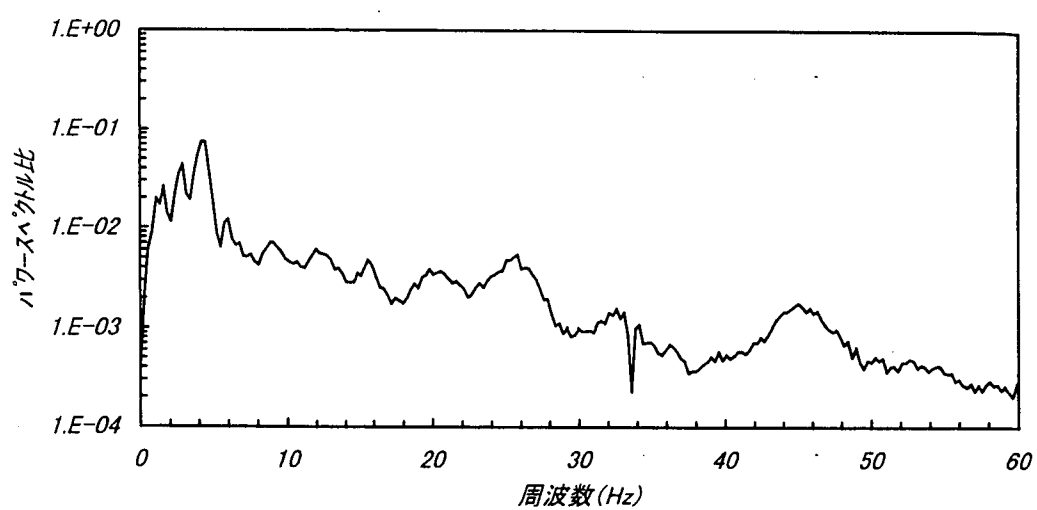


図-6.13 音源のパワースペクトル (原型換算値)

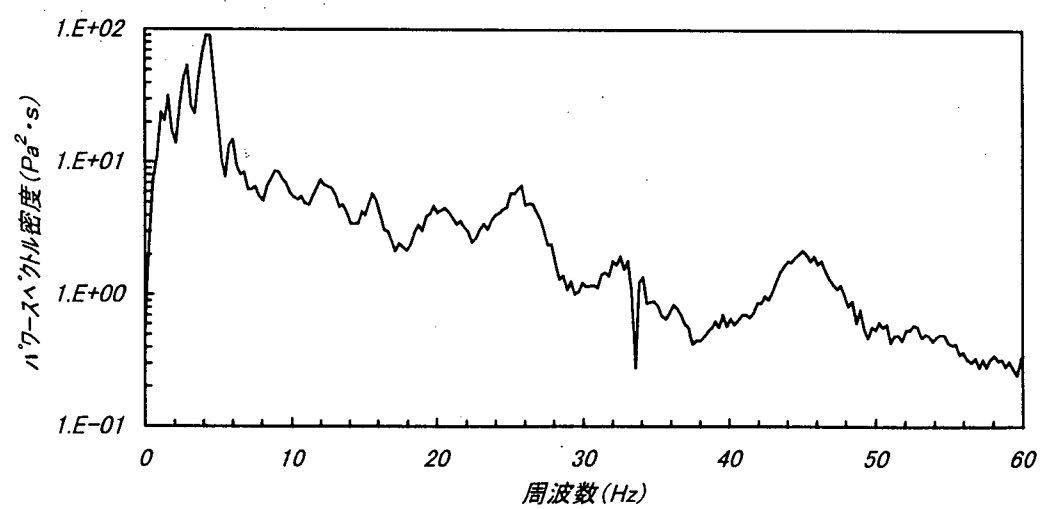


図-6.14 音源のパワースペクトル (原型換算値)

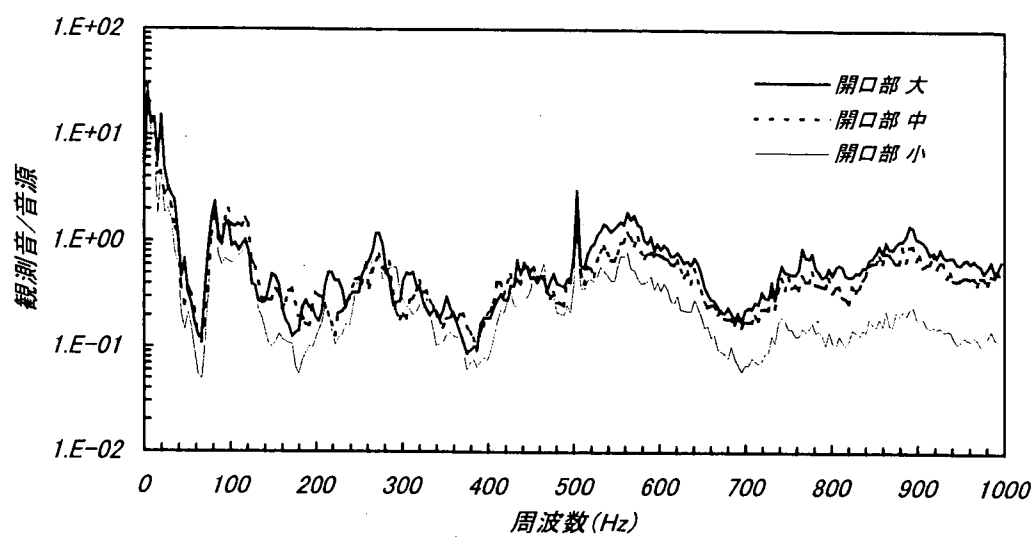


図-6.15 伝達率の周波数分布 (模型値)

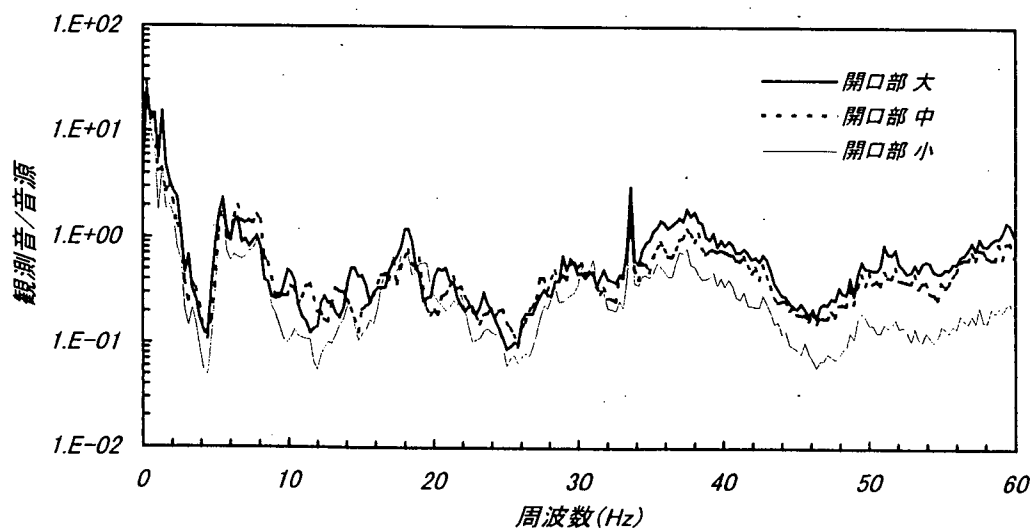


図-6.16 伝達率の周波数分布 (原型換算値)

る音の強さに空き断面の高さを乗じて以下のように求めることができる。

$$W_{out} = hI_{out} \quad (6-8)$$

ここに

W_{out} : トンネル出口から放出される単位幅当たりの音響出力〔w/m〕

I_{out} : トンネル出口で測定した音の強さ〔w/m²〕、 h : 空き断面高さ

始端部において発生する音響エネルギーとトンネル出口から放出される音響エネルギーの比を求めると次式となるが、この値は1を超えることできない。

$$\frac{W_{out}}{W_i} = \frac{hI_{out}}{2\pi I_i} = \frac{0.33}{2\pi} \cdot \frac{I_{out}}{I_i} = 0.05d \leq 1 \quad (6-9)$$

ここに

d : 着目する周波数の伝達率、 h : 空き断面高さ (=0.33m)

よって

$$d \leq 20 \quad (6-10)$$

となり、取り得る伝達率の最大値は20程度となる。したがって、トンネル内では始端部に発生した音が単純に伝播するだけではなく、トンネル式とすることで低周波帯に新たな音源が加わっているものと考えられる。音源としては水面変動による空間形状の変化等が考えられるものの、新たな音源の特定やその定量的な評価は今後の課題として残されている。現時点ではこうした音源そのものの変化も伝達率に取り込んだ形で原型値への換算を行うこととする。

6.3.2 トンネル出口における観測音

トンネル出口における観測音は、図-6.14に示した原型における音源のパワースペクトル密度に図-6.16の伝達率を乗じることにより求めることができる。図-6.17aに推定されるトンネル出口付近の観測音を示す。推定された音圧のパワースペクトル密度は、5 Hz以下の超低周波領域に卓越周波数を持ち、オーバーオール値は表-6.5に示すように20~10Pa (115~120dB) 程度である。

表-6.5 トンネル出口における観測音のオーバーオール値

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
音圧 (Pa)	19.6	17.0	13.7
音圧レベル (dB)	119.8	118.6	116.7

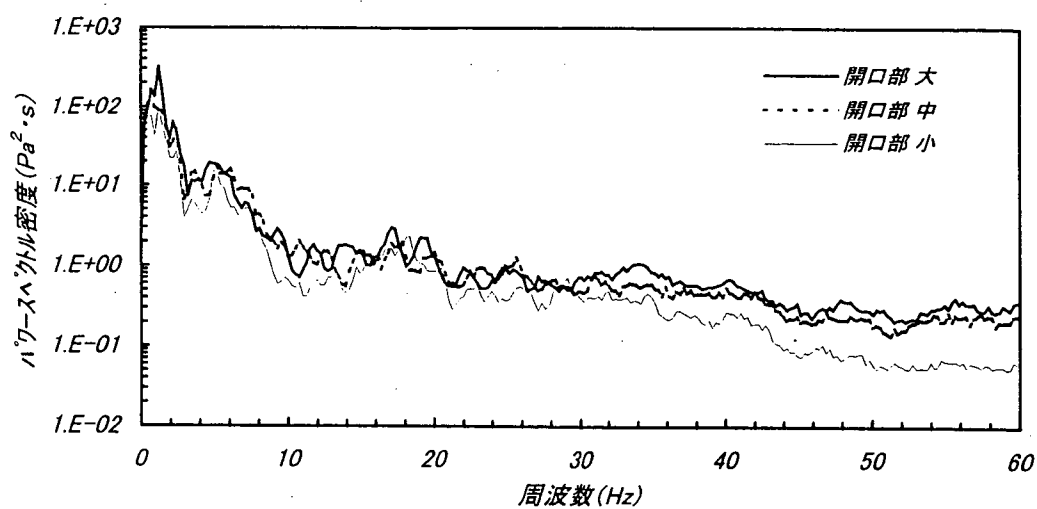


図-6.17a トンネル出口観測音のパワースペクトル (原型換算値)

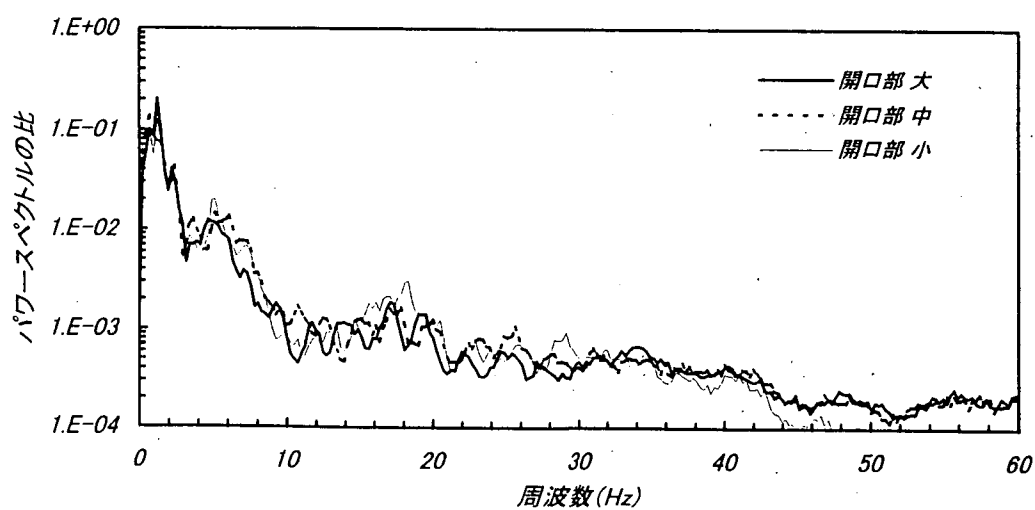


図-6.17b トンネル出口観測音のパワースペクトル (原型換算値)

15Hz以下の超低周波帯の詳細を確認するために図-6.18に1/3オクターブ分析結果を示した。これによれば1～2 Hz付近に卓越周波数を持つ周波数分布となっている。また、図-6.19に音源（図-6.10に示した原型値を1/3オクターブ分析で表現したもの）との比較を示した。減勢工をトンネル式とすることにより卓越周波数がより低周波側に移行していることがわかる。

以上は設計対象流量時における推定音であるが、これまでの議論から明らかなように（6.4）式で与えられる音圧（Pa）のオーバーオール値とトンネル出口における推定音圧（Pa）のオーバーオール値（表-5.3に示した値）は、流量や水位条件などを変化させた場合についても、同じ伝達率を用いて計算すれば次式に示すように比例関係になる。

$$p_{ob} = \varepsilon p_s \quad (6-11)$$

ここに p_{ob} : トンネル出口の観測音圧実効値 [Pa]

p_s : (6-4) 式より計算される跳水始端部直上の音圧実効値 [Pa]

ε : オーバーオール値の伝達率

この比例乗数 ε を求めると表-6.6となる。この比例乗数は周波数の重み付けを行って求めたオーバーオール値の伝達率といえることができる。したがって、任意の流量条件に対して音圧のオーバーオール値を求めれば、この伝達率を乗じるによりトンネル出口における音圧（Pa）のオーバーオール値を推定することができる。

表-6.6 音源音圧とトンネル出口観測音圧の比（伝達率 ε ）

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
音圧の比 ε	1.10	0.952	0.766

(6-4)式および(6-11)式を用いればトンネル出口の観測音圧 p_{ob} は次式で表すことができる。

$$p_{ob} = \varepsilon \sqrt{\frac{\alpha \rho_w \rho_a Q c'^2 c g (H_r - 24)}{2 \times 15.3 \times \pi B}} \quad (\text{Pa}) \quad (6-12)$$

ここに

ε : 伝達率、 α : 変換効率、 ρ_w : 水の密度 [kg/m³]、 ρ_a : 空気の密度 [kg/m³]

Q : 流量 [m³/s]、 c' : 貯水位から着水までの間の損失係数 (≈ 0.9)、 c : 音速 [m/s]、

g : 重力加速度 [m/s²]、 H_r : 貯水位 [m]、 B : 減勢池幅

これを用いて天ヶ瀬ダムの貯水位を最低水位、発電最低水位および制限水位とした場合の流量とトンネル出口観測音圧レベルの関係を求めると図-6.20となる。

6.3.3 トンネル式放流設備としての音響出力

前節で推定した値はトンネル出口部において観測される音圧である。トンネルから離れた任意の位置

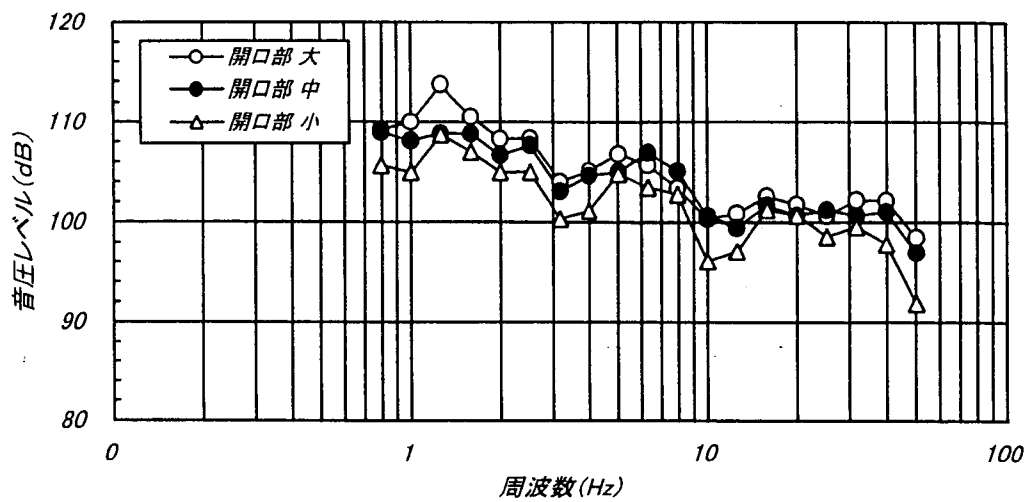


図-6.18 トンネル出口観測音の1/3オクターブ分析（原型換算値）

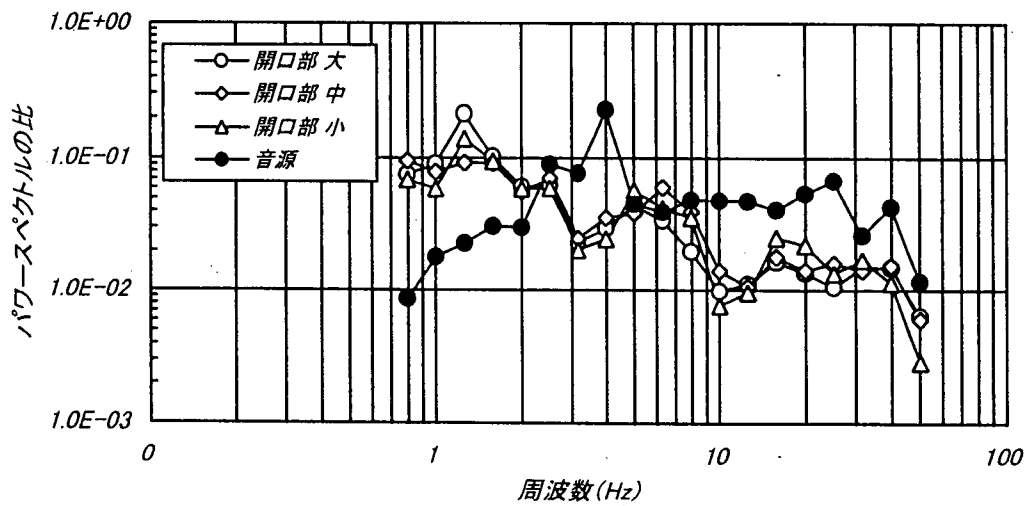


図-6.19 トンネル出口音と音源の比較（原型換算値）

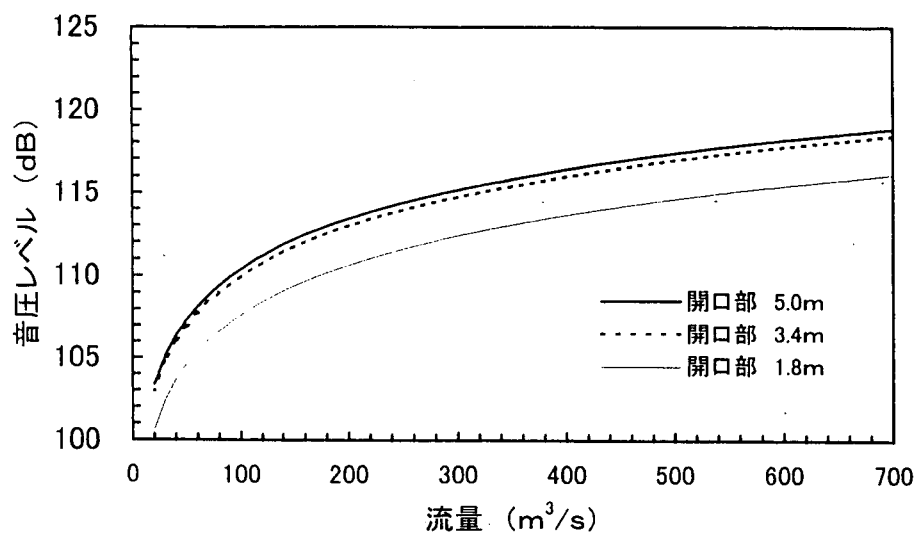


図-6.20a 流量とトンネル出口部の音圧レベルの関係 (最低水位時)

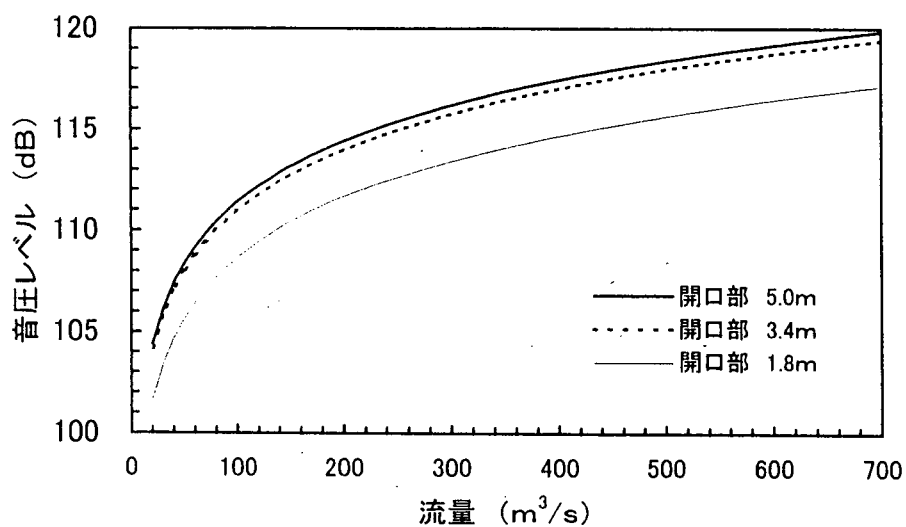


図-6.20b 流量とトンネル出口部の音圧レベルの関係 (発電最低水位時)

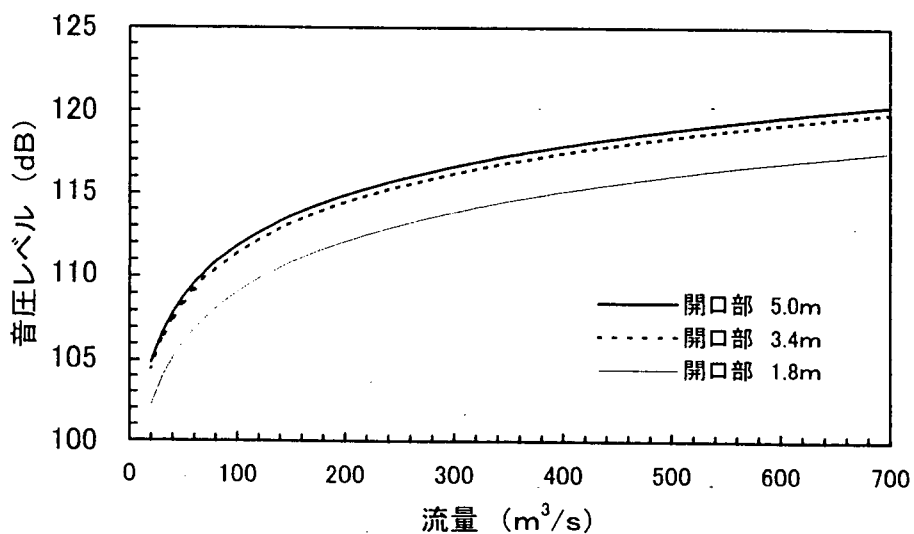


図-6.20c 流量とトンネル出口部の音圧レベルの関係 (制限水位時)

における音圧を推定するためにはトンネル式放流設備としての音響出力を知る必要がある。(6-7)式で得られる音圧と音の強さ(単位面積を通過する音のエネルギー)の関係は次式で与えられる。

$$I = \frac{p_{ob}^2}{\rho_a c} \quad [w/m^2] \quad (6-13)$$

したがって、トンネル式放流設備全体からトンネル外部に放出される音のエネルギー(音響出力)は、上記の音の強さ I にトンネル出口の空き断面の面積 S を乗じて求めることができる。

$$W = SI = Bh \frac{p_{ob}^2}{\rho_a c} \quad [w] \quad (6-14)$$

ここに、 h : 空き断面の高さ

(6-14)式より設計対象流量(発電最低水位、 $700 m^3/s$)時の音響出力を計算すると表-6.6となる。なお、始端部における音響出力は(6-3)式で計算したように $74.2 w/m$ であるから、減勢工全体の跳水始端部からの出力はこれに減勢工幅 $22.6 m$ を乗じて $1,676 w$ ($152 dB$)である。これは減勢工をトンネル構造としない場合の音響出力を示しているとも考えることができる。したがって、天ヶ瀬ダムが減勢工はトンネル式とすることによって発生する音のエネルギーを $10 \sim 20 dB$ (エネルギーの絶対値では $2 \sim 7\%$ にまで)低減することができていることになる。なお、これは、音源の音響出力そのものが小さくなっているわけではなく、トンネル構造とすることにより、外部への音響エネルギーの放出量が減少していることを示している。したがって、トンネル内はより大きな音圧となっているが、このエネルギーは外部に放出されることなく、トンネル内で熱エネルギーとして消費されていると考えることができる。

表-6.7 トンネル式減勢工から放出される音響出力

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
音響出力 (w)	105.5	65.0	20.2
音響出力レベル (dB)	140	138	133
低減率	6.3% (12dB)	3.9% (14dB)	1.2% (19dB)

得られた音響出力から、任意の地点における音圧を求めるためにはトンネル出口からの伝播特性を知る必要があり、精度のよい予測を行うためには音響実験あるいは数値シミュレーションが必要である。ここでは、参考までにトンネル出口に点音源があると仮定し、音が $1/4$ 球状に広がるものとしてトンネル出口から距離 R だけ離れた位置における音圧を求めておくに留める。この場合の音の強さと音響出力の関係は、空気中における音の減衰を無視すれば次式で与えられる。

$$I_R = \frac{W}{\pi R^2} \quad [w/m^2] \quad (6-15)$$

ここに、 I_R : トンネルから m 離れた位置における音の強さ $[w/m^2]$ 、

R : トンネル出口からの距離

音圧実効値で表せば

$$p_R = \sqrt{\frac{Bhp_o^2}{\pi R^2}} \quad [\text{Pa}] \quad (6-16)$$

図-6.21は、トンネル出口から10、100および300m離れた位置における発電最低水位時の各流量時の音圧レベルを計算したものである。なお、周波数特性は、流量や水位の条件にかかわらずほぼ図-6.19となるものと考えられる。

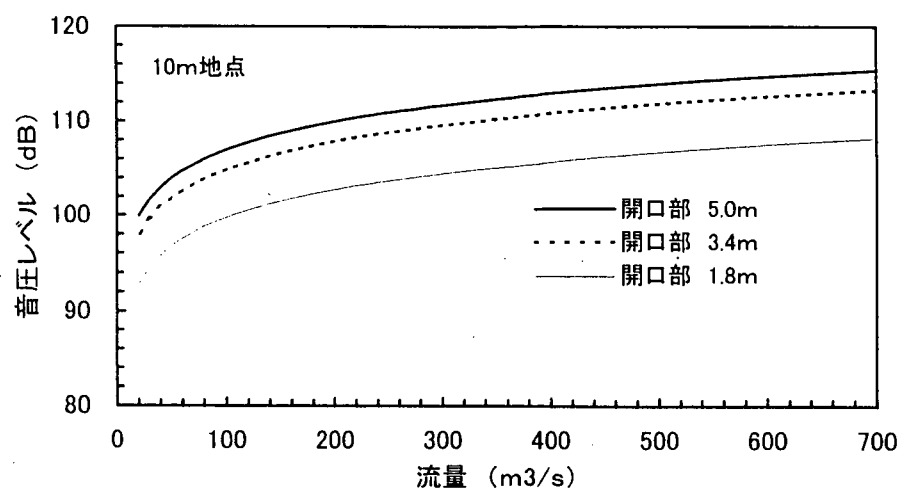


図-6.21a トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル（発電最低水位時）

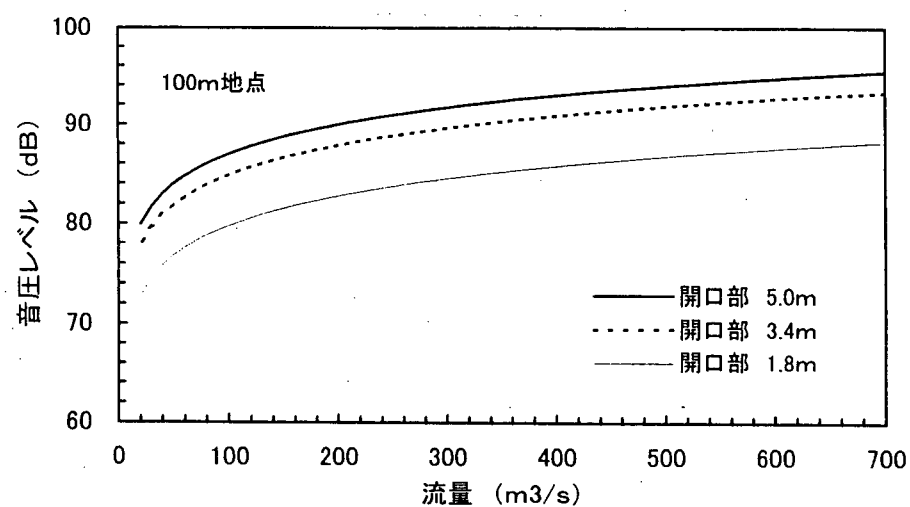


図-6.21b トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル（発電最低水位時）

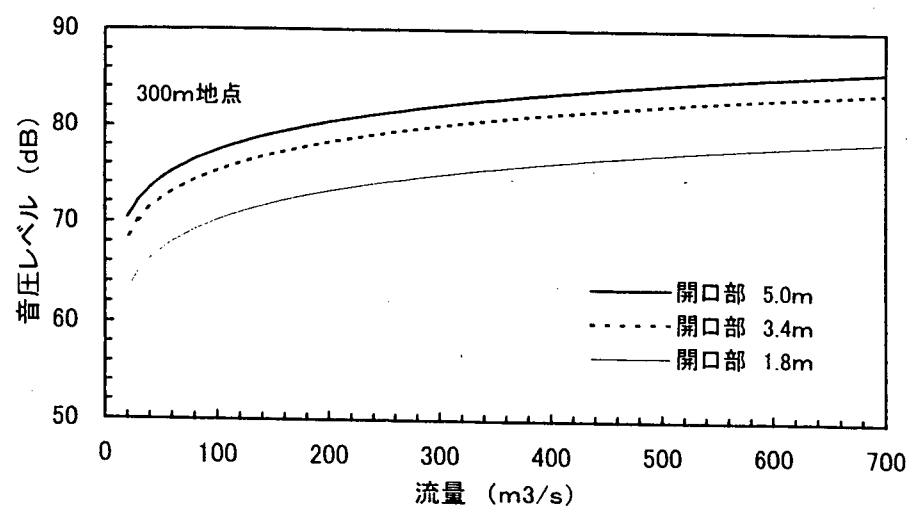


図-6.21c トンネル出口部から離れた位置の音圧レベル（発電最低水位時）

第7章 まとめ

以上の検討結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 発生音の特性

跳水式減勢工およびそれをトンネル式とした場合の放流時に発生する音についての基礎的な検討結果から以下のことがわかった。

跳水時に発生する音の音源については、

- 1) 跳水時の発生音は、跳水始端部からの発生音が支配的である。
- 2) 音源のパワースペクトルは、模型あるいは実機において形状が変化しなければ、極端に流況が変化しない限り流況に依らないほぼ一定の形状を持つ。
- 3) 音源の音響出力は流入エネルギーに比例し、その比例定数すなわち音のエネルギーへの変換効率は、流況をフルード相似とすれば模型・原型ともほぼ同一の値をとる。

トンネル内における伝播特性については

- 4) 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。
- 5) 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。

模型値を原型値に換算するための相似則については

- 6) 音源および伝達関数の周波数特性は、音の相似則により模型値を原型値に換算することできる。
- 7) 以上から第5章で述べた手法により水理模型実験における発生音の測定値から原型値への換算が可能である。なお、跳水時の発生音（音源）についてはこの手法による換算結果が現地観測値とほぼ一致することが確認された。

ただし、現時点では音の発生メカニズム自体が明らかになったわけではない。また、対象とした施設規模や放流方式も限られている。より精度の高い、高範囲な流量条件や異なった形式の放流施設における発生音予測、さらに発生音の低減手法を検討するためには、音の発生メカニズムについての基礎的な研究と実験および現地観測によるデータの蓄積が必要である。

(2) 天ヶ瀬ダムトンネル式放流設備における発生音の推定

上記の検討結果に基づいて、天ヶ瀬ダムに新設されるトンネル式放流設備減勢工における発生音を推定すると以下のとおりとなる。

- 8) 放流時にトンネル出口において観測される音圧 p_{ob} は次式で表すことができる。

$$p_{ob} = \varepsilon \sqrt{\frac{\alpha \rho_w \rho_a Q c^2 c g (H_r - 24)}{2 \times 15.3 \times \pi B}} \quad [\text{Pa}] \quad (7-1)$$

ここに

ε : 伝達率、 α : 変換効率、 ρ_w : 水の密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 ρ_a : 空気の密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Q : 流量 [m^3/s]、 c' : 貯水位から着水までの間の損失係数 (≈ 0.9)、 c : 音速 [m/s]、
 g : 重力加速度 [m/s^2]、 H_r : 貯水位 [m]、 B : 減勢池幅

また、模型実験結果から

$$\alpha = 7.0 \times 10^{-6}$$

ε についてはトンネル出口部の空き断面の高さによって異なり、次表で与えられる。

表-7.1 音源音圧とトンネル出口観測音圧の比 (伝達率 ε)

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
音圧の比 ε	1.10	0.952	0.766

これから天ヶ瀬ダムの設計対象の流量条件 (水位 : 発電最低水位 O.P 67.7m、流量 : $700\text{m}^3/\text{s}$) 時のトンネル出口における観測音圧を求めると次表となる。また、周波数特性は、図-7.1に示したとおりである。

表-7.2 トンネル出口における観測音のオーバーオール値

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
音圧 (Pa)	19.6	17.0	13.7
音圧レベル (dB)	119.8	118.6	116.7

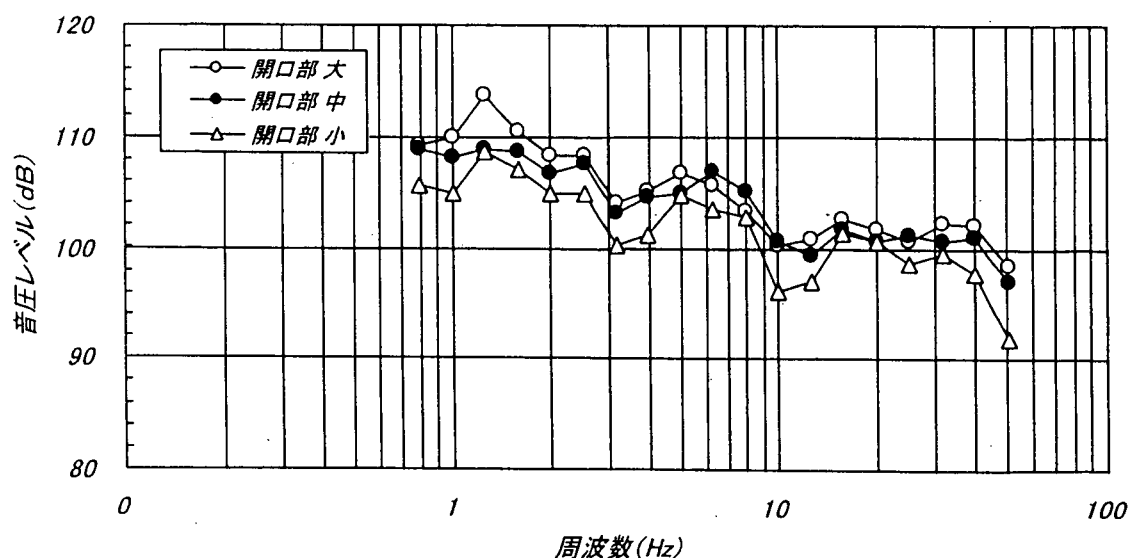


図-7.1 トンネル出口観測音の1/3オクターブ分析 (原型換算値)

9) 同流量条件におけるトンネル式放流設備全体としての音響出力は次表のとおりである。一方、トンネル構造としない場合の音響出力は1,676w (152dB) である。したがって、施設をトンネル式とすることにより、発生する音のエネルギーは10～20 dB (エネルギーの絶対値では2～7%にまで) 低減されている。

表-7.3 トンネル式減勢工から放出される音響出力

空き断面高さ (m)	5.0	3.4	1.8
音響出力 (w)	105.5	65.0	20.2
音響出力レベル (dB)	140	138	133
低減率	6.3% (12dB)	3.9% (14dB)	1.2% (19dB)

あとがき

本報告書は、天ヶ瀬ダムに新設されるトンネル式放流設備の減勢工において発生する超低周波音について、水理模型実験および現地観測による検討を行った結果をとりまとめたものである。

本調査の担当者は次の通りであり、本報告書の執筆は桜井力が担当した。

柏井 条介（平成6年度～平成10年度、水工水資源研究室長）

桜井 力（平成9年度～平成11年度、主任研究員）

安達 孝実（平成6年度～平成9年度、当時：研究員）

櫻井 寿之（平成9年度～平成11年度、研究員）

最後に、本検討を進めるにあたって、近畿地方建設局琵琶湖工事事務所をはじめとする多くの方々の御指導並びに御協力を賜りましたことを、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柏井条介、桜井力、櫻井寿之：天ヶ瀬ダム水理模型実験報告書、土木研究所資料、第3623号、1999.3
- 2) 森靖夫、水上雅人、武士俣健：剛球または水滴の水面への落下および水流により発生する音の研究、機械学会論文集(B編)、第53巻、487号、pp.903-909、1987
- 3) Minnarert, M. : Philos.Mag., 16、pp.235-248、1933
- 4) 例えば、谷一郎編：流体力学の進歩、丸善、pp.221-262、1980
- 5) 泉完：跳水型落差工の斜面上における減勢音特性、農業土木学会誌、第63巻、第5号、pp.507-512、1988
- 6) 例えば、五十嵐寿一編：音響と振動、共立出版、pp.88-90、1968
- 7) 橘秀樹、石井聖光：音響実験における相似則と実験手法、日本音響学会誌、32巻、10号、pp.621-630、1976
- 8) 吉久光一、橘秀樹、石井聖光：模型実験による騒音の広域伝播性状の検討、音響技術、No.22、pp.37-44、1978
- 9) 櫻井寿之、柏井条介、桜井力：跳水式減勢工内の空気混入量、第26回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、土木学会、1999.3
- 10) 桜井力、柏井条介、櫻井寿之：地下に設けられる跳水式減勢工の発生音特性、水工学論文集、第43巻、pp.491-496、1999
- 11) 桜井力、柏井条介、櫻井寿之：水理模型実験における跳水発生音と模型縮尺、土木技術資料、40-3、pp.26-31、1998

付表・付図

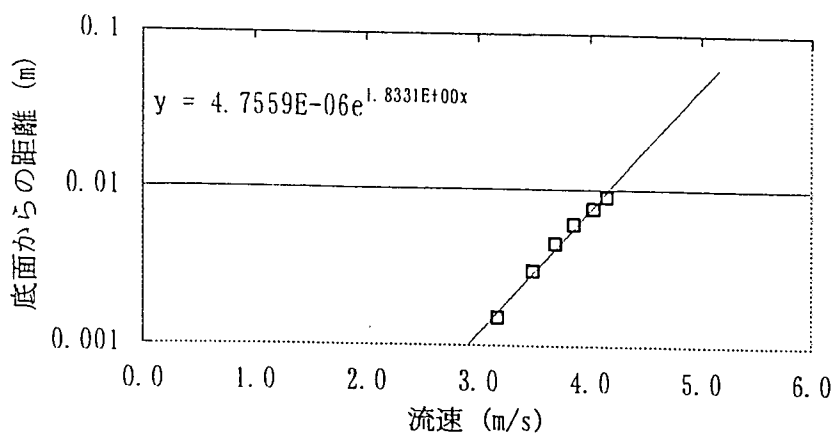
- 付表-3.1 天井がない場合の跳水始端部直上およびトンネル出口位置における測定音圧
- 付図-3.1 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=1.5\text{cm}$)
- 付図-3.2 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=2\text{cm}$)
- 付図-3.3 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=3\text{cm}$)
- 付図-3.4 流入水脈の流速分布 (1/1 模型、 $h_1=3\text{cm}$)
- 付図-3.5 流入水脈の流速分布 (1/1 模型、 $h_1=4\text{cm}$)
- 付図-3.6 流入水脈の流速分布 (1/1 模型、 $h_1=6\text{cm}$)
- 付図-3.7 流入水脈の流速分布 (3/2 模型、 $h_1=4.5\text{cm}$)
- 付図-3.8 流入水脈の流速分布 (3/2 模型、 $h_1=6\text{cm}$)
- 付図-3.9 流入水脈の流速分布 (3/2 模型、 $h_1=4.5\text{cm}$)
- 付図-3.10 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=6\text{cm}$)
- 付図-3.11 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=8\text{cm}$)
- 付図-3.12 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=12\text{cm}$)
- 付図-3.13 1/2 模型副ダム原型状の流況図 ($D=43.5\text{cm}$ 、 $h_1=1.5\text{cm}$)
- 付図-3.14 1/2 模型副ダム原型状の流況図 ($D=43.5\text{cm}$ 、 $h_1=2\text{cm}$)
- 付図-3.15 1/2 模型副ダム原型状の流況図 ($D=43.5\text{cm}$ 、 $h_1=3\text{cm}$)
- 付図-3.16 1/1 模型副ダム原型状の流況図 ($D=87\text{cm}$ 、 $h_1=3\text{cm}$)
- 付図-3.17 1/1 模型副ダム原型状の流況図 ($D=87\text{cm}$ 、 $h_1=4\text{cm}$)
- 付図-3.18 1/1 模型副ダム原型状の流況図 ($D=87\text{cm}$ 、 $h_1=6\text{cm}$)
- 付図-3.19 3/2 模型流況図 ($h_1=4.5\text{cm}$)
- 付図-3.20 3/2 模型流況図 ($h_1=6\text{cm}$)
- 付図-3.21 3/2 模型流況図 ($h_1=9\text{cm}$)
- 付図-3.22 2/1 模型流況図 ($h_1=6\text{cm}$)
- 付図-3.23 2/1 模型流況図 ($h_1=8\text{cm}$)
- 付図-3.24 2/1 模型流況図 ($h_1=12\text{cm}$)
- 付表-4.1 天井を設けた場合のトンネル出口の測定音圧
- 付図-4.1 a 0.5倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.1 b 0.5倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.2 a 1 倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.2 b 1 倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.3 a 1.5倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.3 b 1.5倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.4 a 2 倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.4 b 2 倍模型観測音 (給気管直上) のパワースペクトル分布
- 付図-4.5 1/1 模型副ダム比較形状の流況図 ($D=87\text{cm}$ 、 $h_1=3\text{cm}$)
- 付図-4.6 1/1 模型副ダム比較形状の流況図 ($D=87\text{cm}$ 、 $h_1=4\text{cm}$)
- 付図-4.7 1/1 模型副ダム比較形状の流況図 ($D=87\text{cm}$ 、 $h_1=6\text{cm}$)

付表-3.1 天井がない場合の跳水始端部直上およびトンネル出口位置における測定音圧

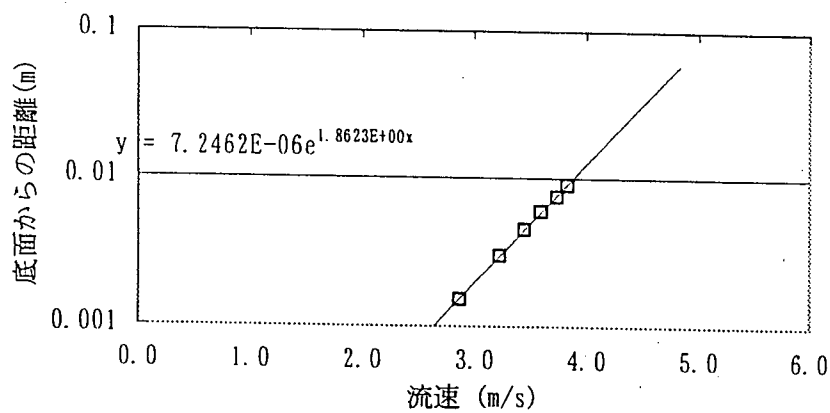
実験No.	縮尺	天井の有無	流入水脈の水利条件							始端部音圧		音源の出力		変換効率 α %	トンネル出口音圧	
			鉄管厚 h_i cm	流入水脈厚 h' cm	水位 Z m	流量 Q l/s	流速 v m/s	流入エネルギー E/B J/(m $\cdot$ s)	フルード数 Fr	圧力 Prms Pa	レベル L_p dB	出力 W/B J/(m $\cdot$ s)	レベル L_w dB		圧力 Prms Pa	レベル L_p dB
1-1-a	1/2	なし	1.5	1.29	1.50	9.7	3.76	343	10.6			0.001190	35.5	3.47E-06	0.195	79.8
1-2-a	1/2	なし	1.5	1.15	1.25	8.1	3.52	251	10.5			0.001048	34.4	4.17E-06	0.183	79.2
1-3-a	1/2	なし	1.5	1.03	1.00	6.2	3.01	140	9.5			0.000733	31.3	5.22E-06	0.153	77.7
1-4-a	1/2	なし	2.0	1.57	1.50	13.3	4.24	597	10.8			0.001394	91.4	2.34E-04	0.211	80.5
1-5-a	1/2	なし	2.0	1.48	1.25	11.0	3.72	380	9.8			0.000883	89.5	2.33E-04	0.168	78.5
1-6-a	1/2	なし	2.0	1.30	1.00	8.3	3.19	211	8.9			0.000622	87.9	2.94E-04	0.141	77.0
1-7-a	1/2	なし	3.0	2.33	1.50	20.1	4.31	935	9.0			0.004262	96.3	4.56E-04	0.369	85.3
1-8-a	1/2	なし	3.0	2.14	1.25	15.7	3.67	528	8.0			0.002019	93.1	3.82E-04	0.254	82.1
1-9-a	1/2	なし	3.0	1.87	1.00	11.9	3.18	301	7.4			0.001071	90.3	3.56E-04	0.185	79.3
2-1-a	1.0	なし	3.0	2.44	3.00	28.2	5.78	2,354	11.8	1.095	94.8	0.0109	100.4	4.64E-04	0.351	84.9
2-2-a	1.0	なし	3.0	2.31	2.50	23.4	5.06	1,501	10.6	0.904	93.1	0.0075	98.7	4.96E-04	0.275	82.8
2-3-a	1.0	なし	3.0	2.00	2.00	18.3	4.58	958	10.3	0.681	90.6	0.0042	96.3	4.42E-04	0.206	80.3
2-4-a	1.0	なし	4.0	3.44	3.00	37.7	5.48	2,830	9.4	1.248	95.9	0.0142	101.5	5.02E-04	0.422	86.5
2-5-a	1.0	なし	4.0	3.03	2.50	31.3	5.17	2,088	9.5	1.131	95.0	0.0117	100.7	5.59E-04	0.365	85.2
2-6-a	1.0	なし	4.0	2.53	2.00	23.8	4.70	1,316	9.4	0.852	92.6	0.0066	98.2	5.03E-04	0.269	82.6
2-7-a	1.0	なし	6.0	4.76	3.00	54.6	5.74	4,490	8.4	1.403	96.9	0.0179	102.5	4.00E-04	0.892	93.0
2-8-a	1.0	なし	6.0	4.36	2.50	45.2	5.18	3,036	7.9	1.248	95.9	0.0142	101.5	4.68E-04	0.485	87.7
2-9-a	1.0	なし	6.0	3.65	2.00	33.8	4.63	1,812	7.7	1.006	94.0	0.0092	99.7	5.09E-04	0.291	83.3
3-1-a	1.5	なし	4.5	3.39	4.50	51.5	7.60	7,429	13.2	1.330	96.5	0.0269	104.3	3.62E-04	0.231	81.3
3-2-a	1.5	なし	4.5	3.22	3.75	43.1	6.69	4,826	11.9	1.229	95.8	0.0229	103.6	4.76E-04	0.210	80.4
3-3-a	1.5	なし	4.5	2.86	3.00	33.5	5.86	2,873	11.1	0.890	93.0	0.0120	100.8	4.19E-04	0.168	78.5
3-4-a	1.5	なし	6.0	4.89	4.50	70.2	7.18	9,042	10.4	1.031	94.2	0.0162	102.1	1.79E-04	0.195	79.8
3-5-a	1.5	なし	6.0	4.36	3.75	57.6	6.61	6,283	10.1	1.395	96.9	0.0296	104.7	4.71E-04	0.211	80.5
3-6-a	1.5	なし	6.0	3.79	3.00	43.9	5.79	3,681	9.5	1.016	94.1	0.0157	102.0	4.26E-04	0.166	78.4
3-7-a	1.5	なし	9.0	6.84	4.50	99.8	7.30	13,279	8.9	1.655	98.4	0.0416	106.2	3.13E-04	0.472	87.5
3-8-a	1.5	なし	9.0	6.30	3.75	82.8	6.57	8,939	8.4	1.449	97.2	0.0319	105.0	3.57E-04	0.263	82.4
3-9-a	1.5	なし	9.0	5.63	3.00	62.2	5.52	4,745	7.4	1.010	94.1	0.0155	101.9	3.27E-04	0.184	79.3
4-1-a	2	なし	6	4.68	6.00	78.8	8.42	13,963	12.4	2.432	101.7	0.0899	109.5	6.44E-04	0.294	83.3
4-2-a	2	なし	6	4.12	5.00	66.2	8.03	10,682	12.6	2.227	100.9	0.0754	108.8	7.05E-04	0.283	83.0
4-3-a	2	なし	6	3.68	4.00	50.6	6.88	5,979	11.4	1.706	98.6	0.0442	106.5	7.40E-04	0.247	81.8
4-4-a	2	なし	8	6.00	6.00	107.4	8.95	21,508	11.7	2.582	102.2	0.1013	110.1	4.71E-04	0.329	84.3
4-5-a	2	なし	8	5.58	5.00	89.4	8.01	14,342	10.8	2.379	101.5	0.0860	109.3	6.00E-04	0.290	83.2
4-6-a	2	なし	8	4.85	4.00	67.2	6.93	8,063	10.0	1.951	99.8	0.0578	107.6	7.17E-04	0.263	82.4
4-7-a	2	なし	12	9.76	6.00	156	7.99	24,909	8.2	2.446	101.7	0.0909	109.6	3.65E-04	0.610	89.7
4-8-a	2	なし	12	9.09	5.00	128.4	7.06	16,012	7.5	2.129	100.5	0.0689	108.4	4.30E-04	0.523	88.3
4-9-a	2	なし	12	7.48	4.00	94.5	6.32	9,427	7.4	1.784	99.0	0.0484	106.8	5.13E-04	0.325	84.2

注) 1. 第3章における実験の測定値を示したものである。

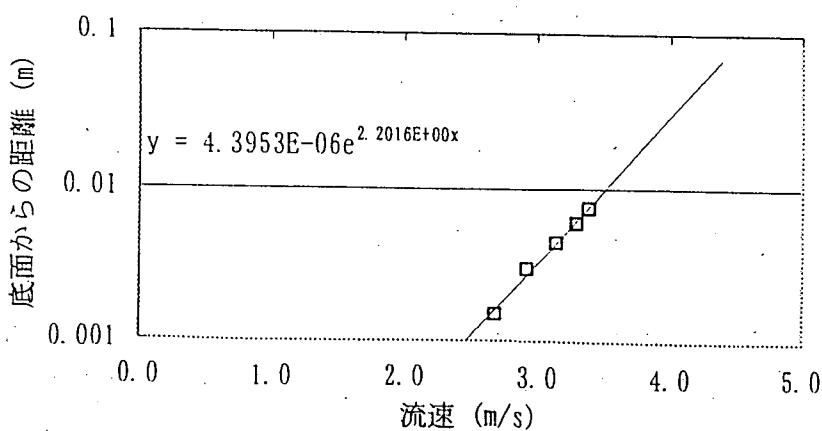
2. 始端部と測点の距離は、1/2倍模型は2.1m、1倍模型は0.6m、1.5倍模型および2倍模型は1mとした。



(a) $h1=1.5\text{cm}$, $Z=1.0\text{m}$



(b) $h1=1.5\text{cm}$, $Z=1.25\text{m}$



(c) $h1=1.5\text{cm}$, $Z=1.0\text{m}$

No.1-1
 $h1=1.5$ (cm)
 $Z=1.5$ (m)
 $Q=9.7$ (L/s)

流入水深 1.29 (cm)
 v' 3.76 (m/s)
 Fr' 10.574

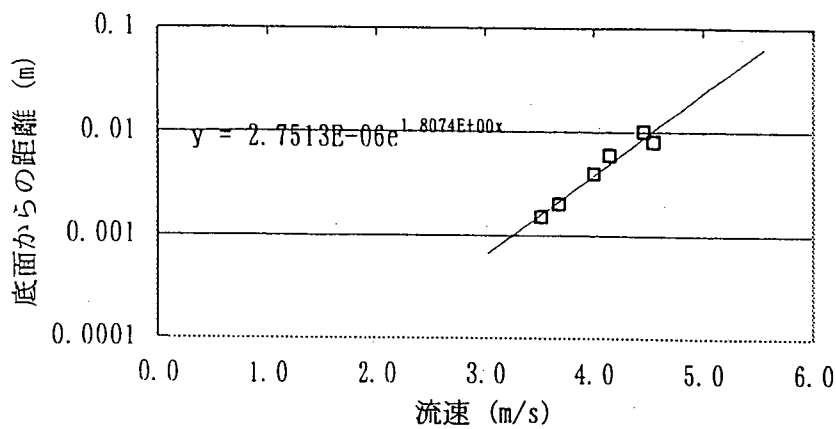
No.1-2
 $h1=1.5$ (cm)
 $Z=1.25$ (m)
 $Q=8.1$ (L/s)

流入水深 1.15 (cm)
 v' 3.52 (m/s)
 Fr' 10.490

No.1-3
 $h1=1.5$ (cm)
 $Z=1.0$ (m)
 $Q=6.3$ (L/s)

流入水深 1.03 (cm)
 v' 3.06 (m/s)
 Fr 9.626

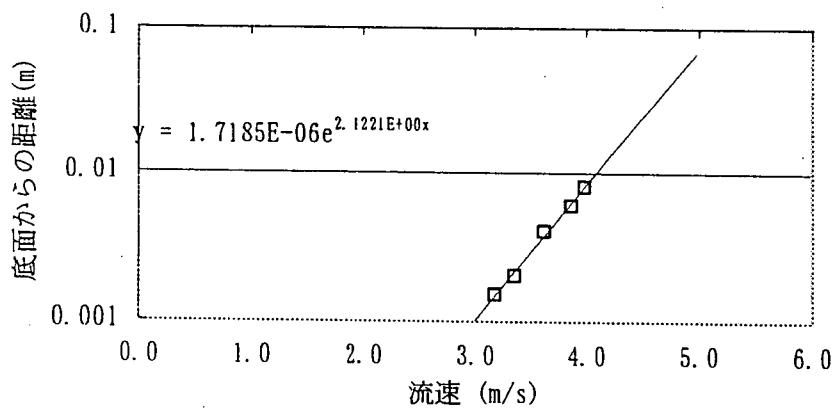
付図-3.1 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h1=1.5\text{cm}$)



(a) $h_1=2\text{cm}$, $Z=1.5\text{m}$

No.1-4
 $h_1=2\text{ (cm)}$
 $Z=1.5\text{ (m)}$
 $Q=13.3\text{ (L/s)}$

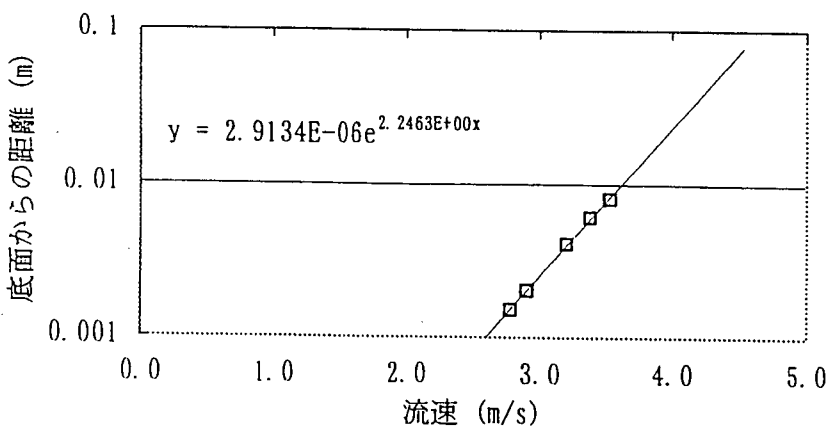
流入水深 1.57 (cm)
 v' 4.24 (m/s)
 Fr' 10.798



(b) $h_1=2\text{cm}$, $Z=1.25\text{m}$

No.1-5
 $h_1=2\text{ (cm)}$
 $Z=1.25\text{ (m)}$
 $Q=11.2\text{ (L/s)}$

流入水深 1.48 (cm)
 v' 3.78 (m/s)
 Fr' 9.935

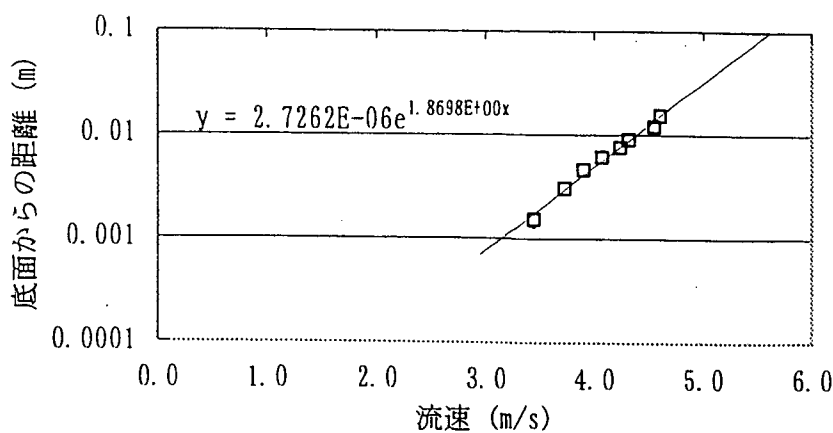


(c) $h_1=2\text{cm}$, $Z=1.0\text{m}$

No.1-6
 $h_1=2\text{ (cm)}$
 $Z=1.0\text{ (m)}$
 $Q=8.5\text{ (L/s)}$

流入水深 1.30 (cm)
 v' 3.27 (m/s)
 Fr 9.159

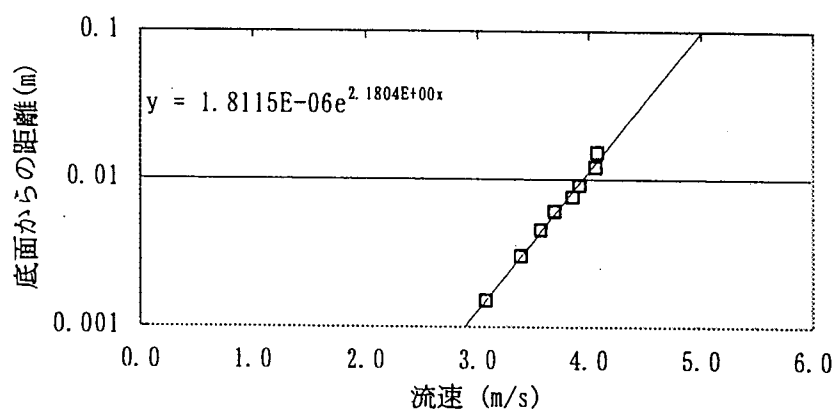
付図-3.2 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=2\text{cm}$)



(a) $h_1=3\text{cm}$, $Z=1.5\text{m}$

No.1-7
 $h_1=3$ (cm)
 $Z=1.5$ (m)
 $Q=20.1$ (L/s)

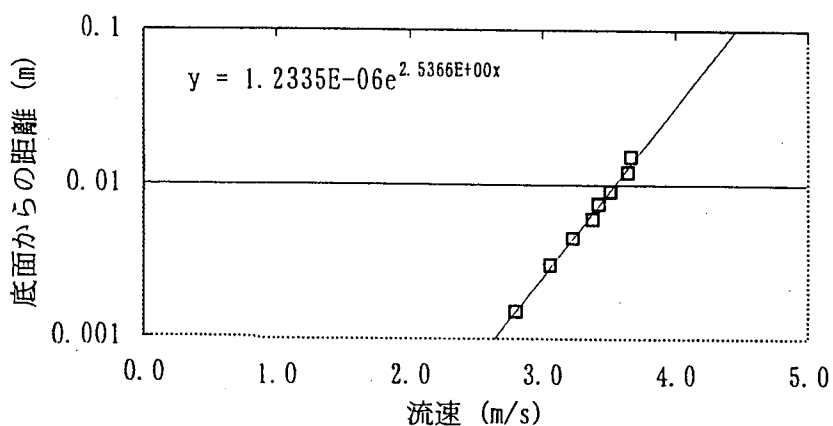
流入水深 2.33 (cm)
 v' 4.30 (m/s)
 Fr' 9.004



(b) $h_1=3\text{cm}$, $Z=1.25\text{m}$

No.1-8
 $h_1=3$ (cm)
 $Z=1.25$ (m)
 $Q=16.5$ (L/s)

流入水深 2.14 (cm)
 v' 3.84 (m/s)
 Fr' 8.393

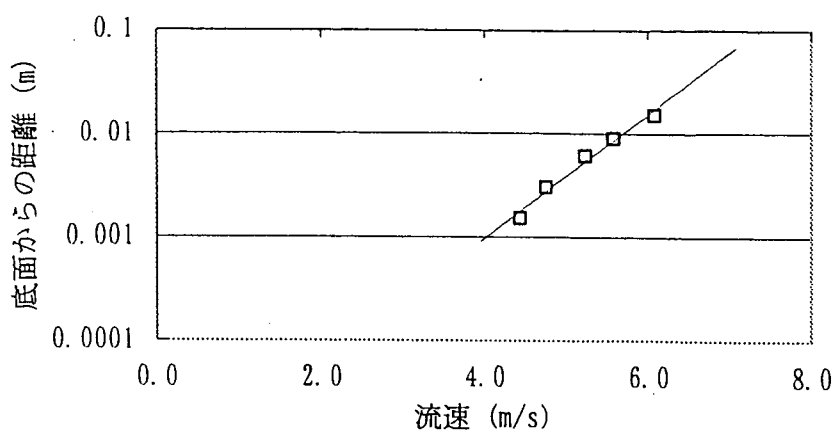


(c) $h_1=3\text{cm}$, $Z=1.0\text{m}$

No.1-9
 $h_1=3$ (cm)
 $Z=1.0$ (m)
 $Q=12.7$ (L/s)

流入水深 1.87 (cm)
 v' 3.40 (m/s)
 Fr 7.93

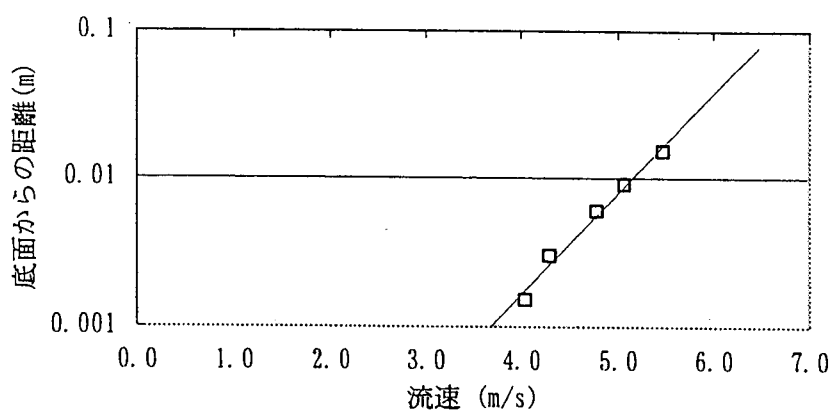
付図-3.3 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=3\text{cm}$)



(a) $h_1=3\text{cm}$, $Z=3\text{m}$

No.2-1
 $h_1=3$ (cm)
 $Z=3$ (m)
 $Q=26.9$ (L/s)

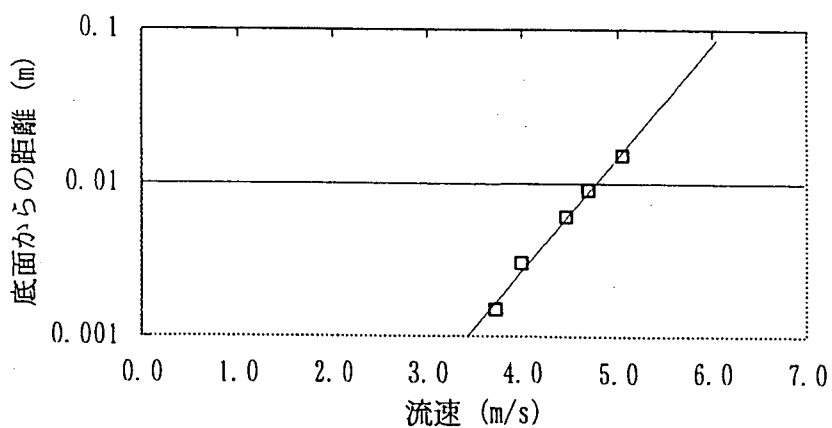
流入水深 2.44 (cm)
 v' 5.50 (m/s)
 Fr' 11.25



(b) $h_1=3\text{cm}$, $Z=2.5\text{m}$

No.2-2
 $h_1=3$ (cm)
 $Z=2.5$ (m)
 $Q=22.9$ (L/s)

流入水深 2.31 (cm)
 v' 4.95 (m/s)
 Fr' 10.40

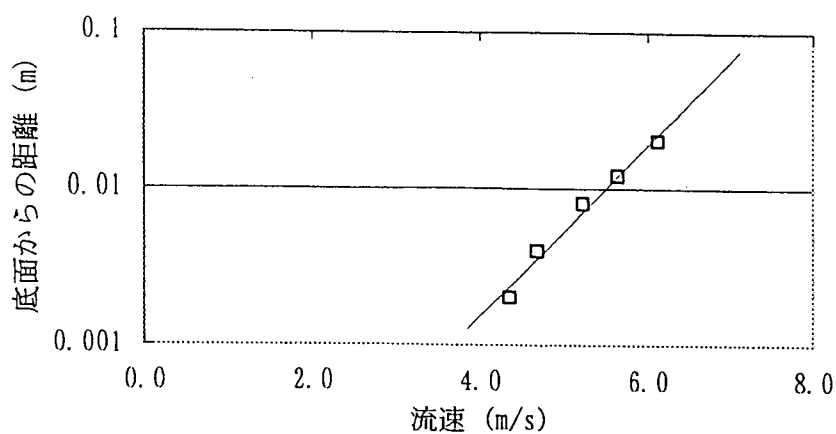


(c) $h_1=3\text{cm}$, $Z=2\text{m}$

No.2-3
 $h_1=3$ (cm)
 $Z=2.0$ (m)
 $Q=18.1$ (L/s)

流入水深 2.00 (cm)
 v' 4.51 (m/s)
 Fr 10.19

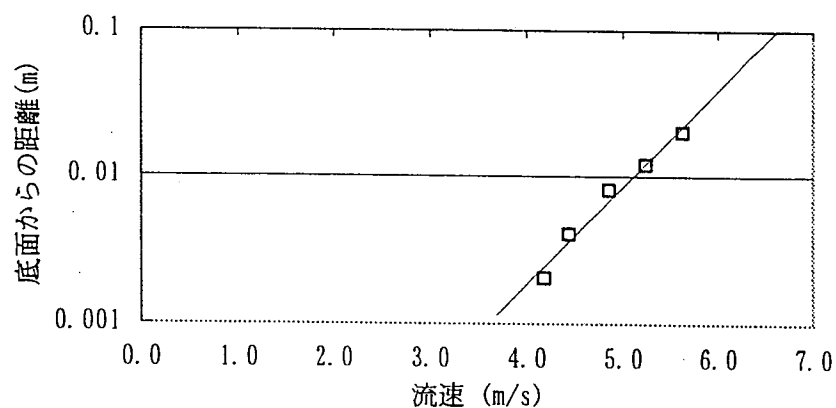
付図-3.4 流入水脈の流速分布 (1/1 模型、 $h_1=3\text{cm}$)



(a) $h_1=4\text{cm}$, $Z=3\text{m}$

No.2-4
 $h_1=4\text{ (cm)}$
 $Z=3\text{ (m)}$
 $Q=38.6\text{ (L/s)}$

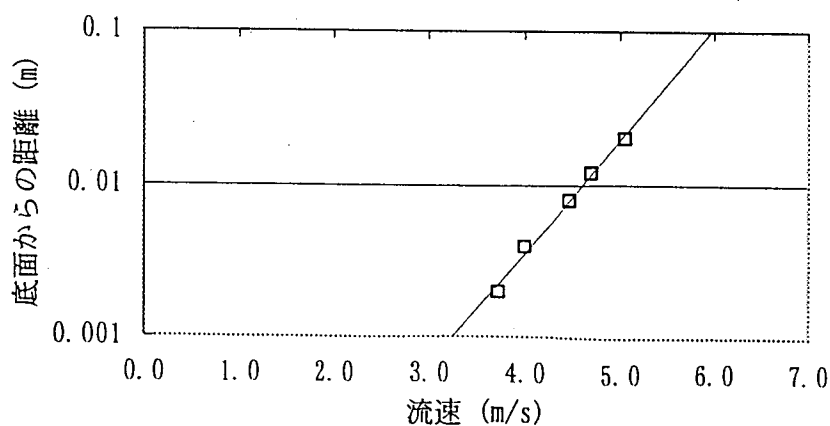
流入水深 3.442 (cm)
 $v' \quad 5.61\text{ (m/s)}$
 $Fr' \quad 9.654$



(b) $h_1=4\text{cm}$, $Z=2.5\text{m}$

No.2-5
 $h_1=4\text{ (cm)}$
 $Z=2.5\text{ (m)}$
 $Q=31.0\text{ (L/s)}$

流入水深 3.034 (cm)
 $v' \quad 5.10\text{ (m/s)}$
 $Fr' \quad 9.354$

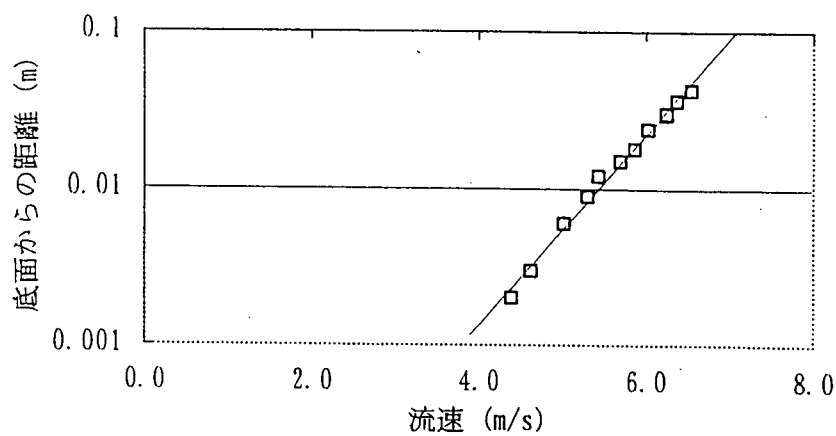


(c) $h_1=4\text{cm}$, $Z=2\text{m}$

No.2-6
 $h_1=4\text{ (cm)}$
 $Z=2.0\text{ (m)}$
 $Q=22.6\text{ (L/s)}$

流入水深 2.53 (cm)
 $v' \quad 4.47\text{ (m/s)}$
 $Fr \quad 8.99$

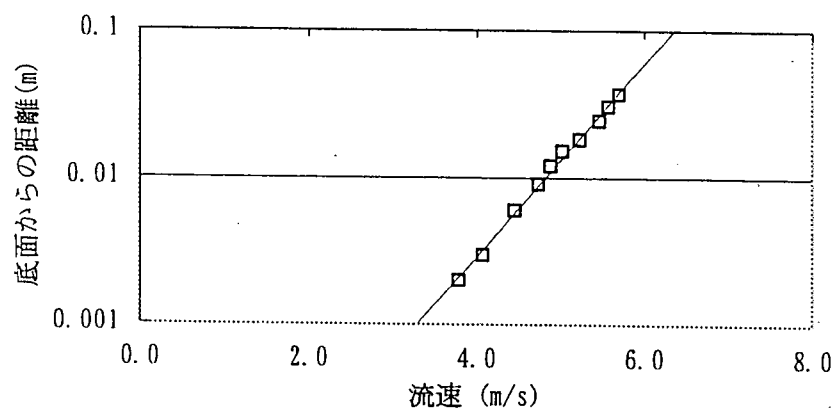
付図-3.5 流入水脈の流速分布 (1/1 模型、 $h_1=4\text{cm}$)



(a) $h_1=6\text{cm}$, $Z=3\text{m}$

No.2-7
 $h_1=6\text{ (cm)}$
 $Z=3\text{ (m)}$
 $Q=55.0\text{ (L/s)}$

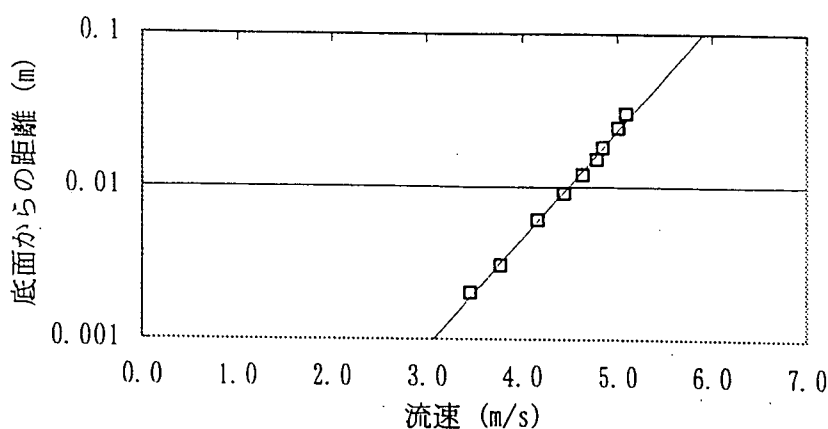
流入水深 4.76 (cm)
 $v' \quad 5.78\text{ (m/s)}$
 $Fr' \quad 8.459$



(b) $h_1=6\text{cm}$, $Z=2.5\text{m}$

No.2-8
 $h_1=6\text{ (cm)}$
 $Z=2.5\text{ (m)}$
 $Q=44.8\text{ (L/s)}$

流入水深 4.39 (cm)
 $v' \quad 5.10\text{ (m/s)}$
 $Fr' \quad 7.771$

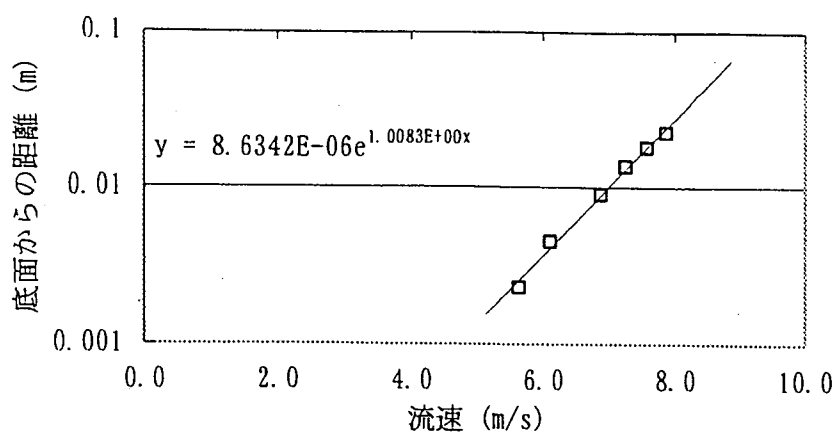


(c) $h_1=6\text{cm}$, $Z=2\text{m}$

No.2-9
 $h_1=6\text{ (cm)}$
 $Z=2.0\text{ (m)}$
 $Q=33.7\text{ (L/s)}$

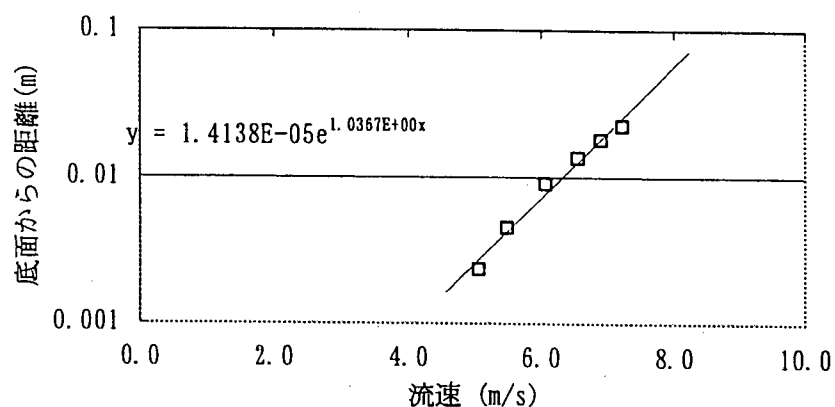
流入水深 3.65 (cm)
 $v' \quad 4.61\text{ (m/s)}$
 $Fr \quad 7.71$

付図-3.6 流入水脈の流速分布 (1/1 模型、 $h_1=6\text{cm}$)



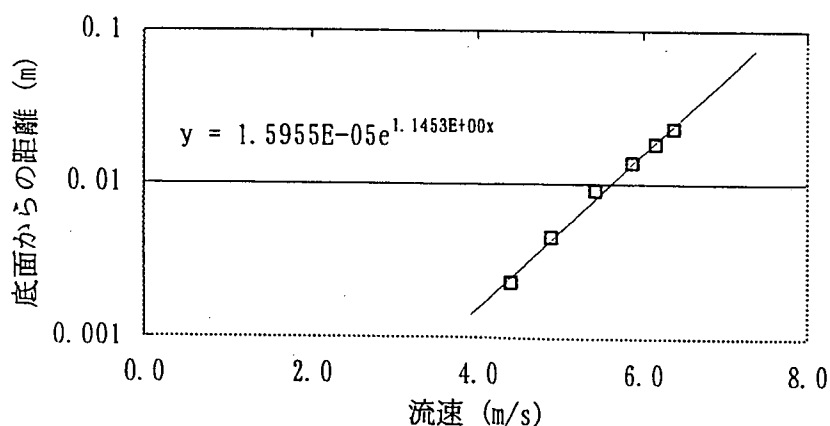
(a) $h1=4.5\text{cm}$, $Z=4.5\text{m}$

No.3-1
 $h1=4.5\text{ (cm)}$
 $Z=4.5\text{ (m)}$
 $Q=49.0\text{ (L/s)}$
 $G=4.2\text{ cm}$
 流入水深 3.39 (cm)
 v' 7.23 (m/s)
 Fr' 12.539



(b) $h1=4.5\text{cm}$, $Z=3.75\text{m}$

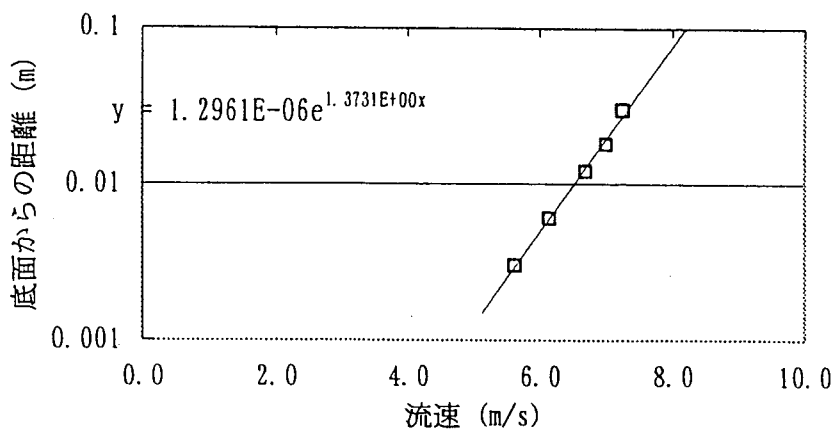
No.3-2
 $h1=4.5\text{ (cm)}$
 $Z=3.75\text{ (m)}$
 $Q=41.4\text{ (L/s)}$
 $G=4.1\text{ cm}$
 流入水深 3.22 (cm)
 v' 6.43 (m/s)
 Fr' 11.444



(c) $h1=4.5\text{cm}$, $Z=3\text{m}$

No.3-3
 $h1=4.5\text{ (cm)}$
 $Z=3.0\text{ (m)}$
 $Q=31.9\text{ (L/s)}$
 $G=3.9\text{ cm}$
 流入水深 2.86 (cm)
 v' 5.57 (m/s)
 Fr 10.52

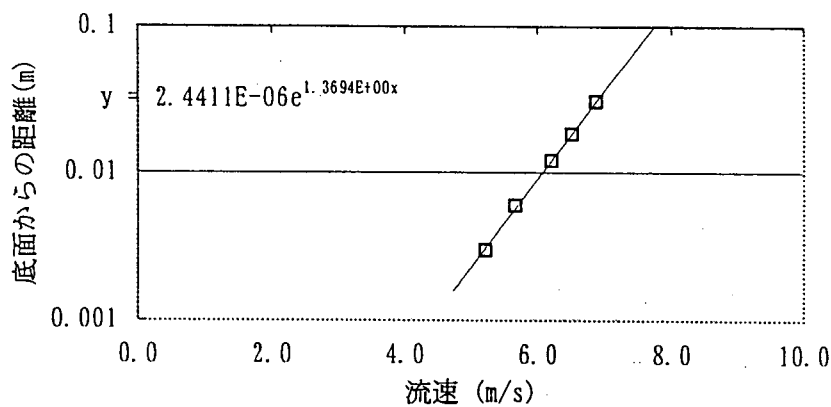
付図-3.7 流入水脈の流速分布 (3/2 模型、 $h1=4.5\text{cm}$)



(a) $h_1=6\text{cm}$, $Z=3\text{m}$

No.3-4
 $h_1=6$ (cm)
 $Z=4.5$ (m)
 $Q=68.8$ (L/s)

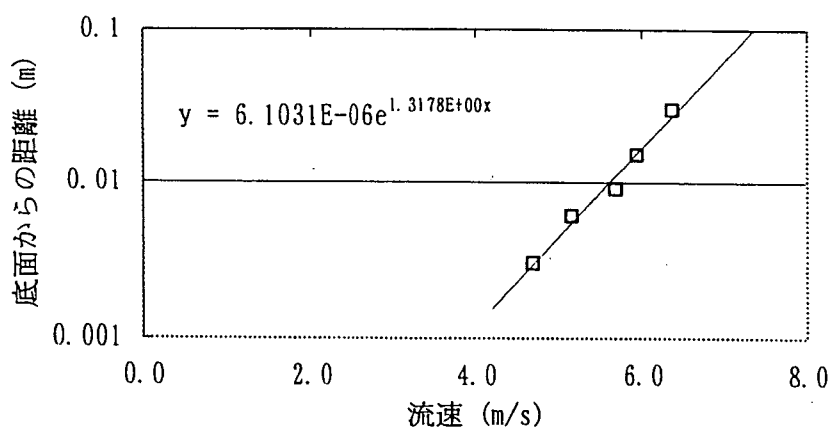
流入水深 4.894 (cm)
 v' 7.03 (m/s)
 Fr' 10.150



(b) $h_1=6\text{cm}$, $Z=2.5\text{m}$

No.3-5
 $h_1=6$ (cm)
 $Z=3.75$ (m)
 $Q=56.0$ (L/s)

流入水深 4.364 (cm)
 v' 6.42 (m/s)
 Fr' 9.811

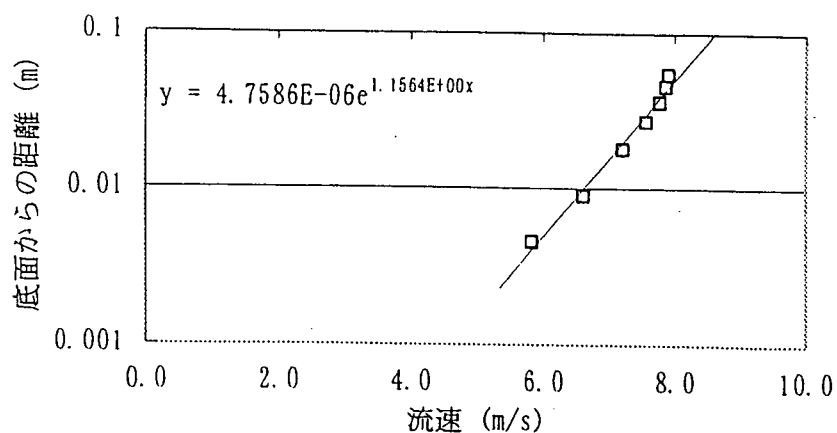


(c) $h_1=6\text{cm}$, $Z=2\text{m}$

No.3-6
 $h_1=6$ (cm)
 $Z=3.0$ (m)
 $Q=44.4$ (L/s)

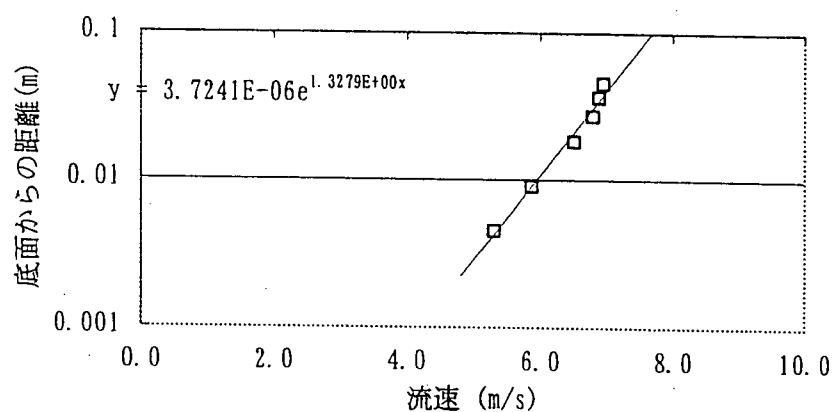
流入水深 3.79 (cm)
 v' 5.86 (m/s)
 Fr 9.616

付図-3.8 流入水脈の流速分布 (3/2 模型、 $h_1=6\text{cm}$)



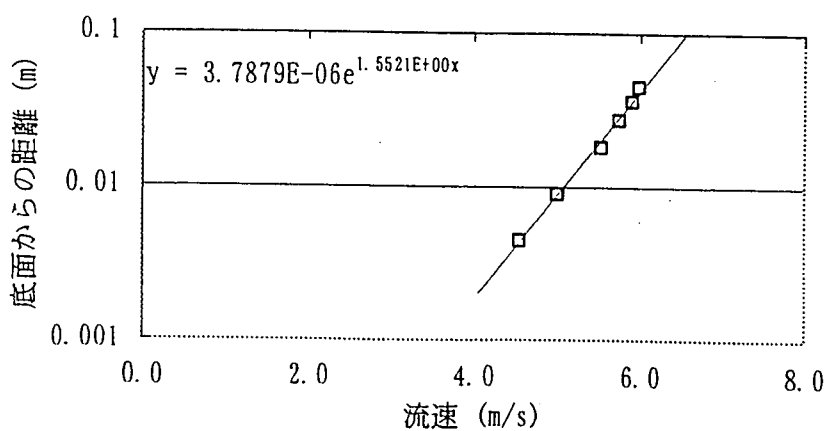
(a) $h_1=9\text{cm}$, $Z=4.5\text{m}$

No.3-7
 $h_1=9$ (cm)
 $Z=4.5$ (m)
 $Q=99.4$ (L/s)
 $G=8.6\text{cm}$
 流入水深 6.837 (cm)
 v' 7.27 (m/s)
 Fr' 8.876



(b) $h_1=9\text{cm}$, $Z=3.75\text{m}$

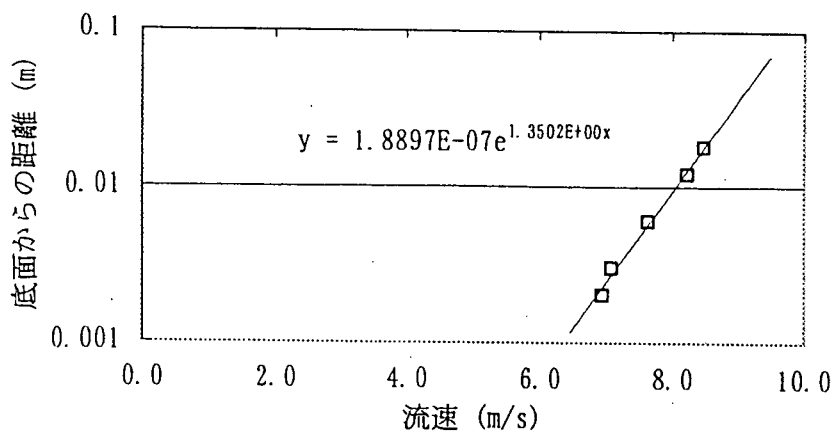
No.3-8
 $h_1=9$ (cm)
 $Z=3.75$ (m)
 $Q=81.1$ (L/s)
 $G=8.3\text{cm}$
 流入水深 6.297 (cm)
 v' 6.44 (m/s)
 Fr' 8.197



(c) $h_1=9\text{cm}$, $Z=3\text{m}$

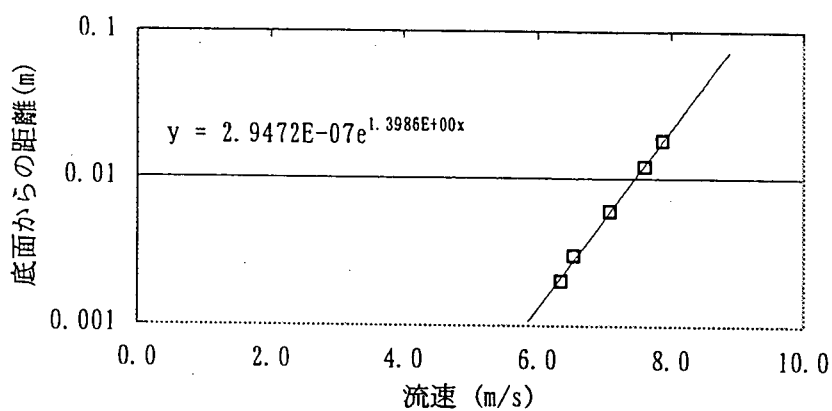
No.3-9
 $h_1=9$ (cm)
 $Z=3.0$ (m)
 $Q=61.0$ (L/s)
 $G=7.9\text{cm}$
 流入水深 5.63 (cm)
 v' 5.42 (m/s)
 Fr 7.30

付図-3.9 流入水脈の流速分布 (3/2 模型、 $h_1=9\text{cm}$)



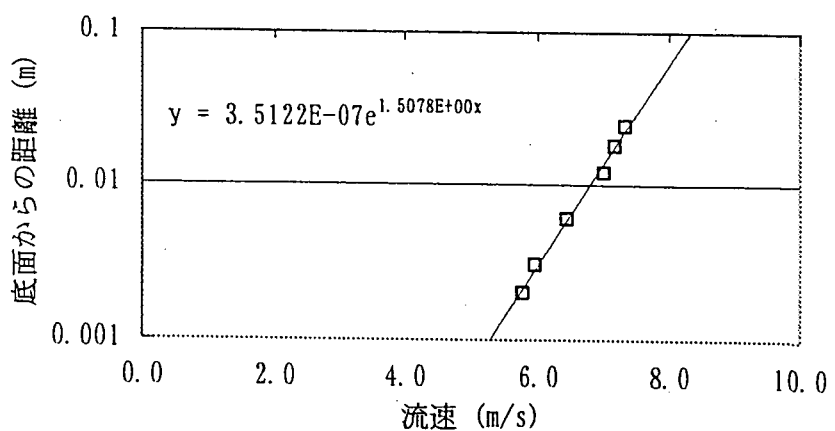
(a) $h_1=6\text{cm}$, $Z=6.0\text{m}$

No.4-1
 $h_1=6$ (cm)
 $Z=6.0$ (m)
 $Q=79.1$ (L/s)
 $G=5.7$ (cm)
 流入水深 4.68 (cm)
 v' 8.45 (m/s)
 Fr' 12.479



(b) $h_1=6\text{cm}$, $Z=5.0\text{m}$

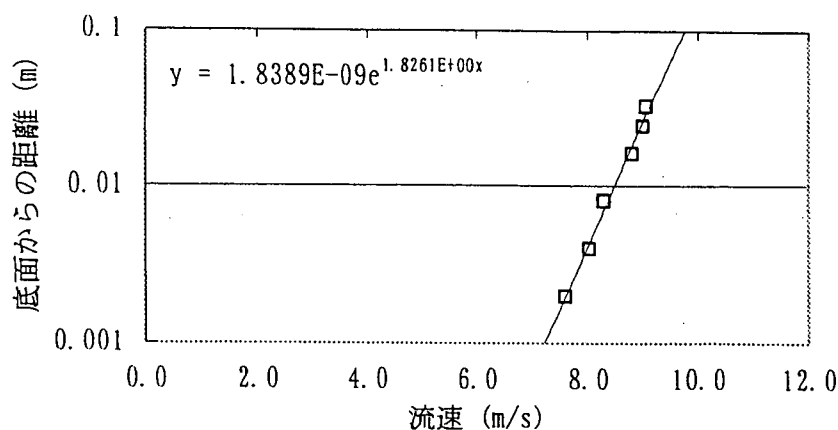
No.4-2
 $h_1=6$ (cm)
 $Z=5.0$ (m)
 $Q=66.3$ (L/s)
 $G=5.5$ (cm)
 流入水深 4.2 (cm)
 v' 7.89 (m/s)
 Fr' 12.293



(c) $h_1=6\text{cm}$, $Z=4.0\text{m}$

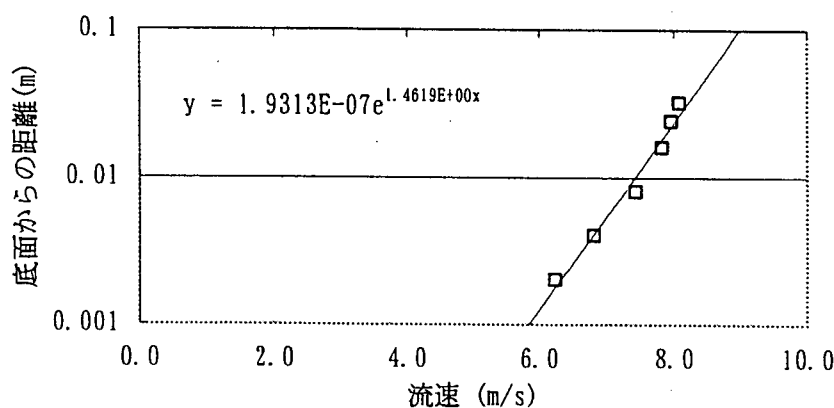
No.4-3
 $h_1=6$ (cm)
 $Z=4.0$ (m)
 $Q=51.6$ (L/s)
 $G=5.1$ (cm)
 流入水深 3.68 (cm)
 v' 7.00 (m/s)
 Fr 11.663

付図-3.10 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=6\text{cm}$)



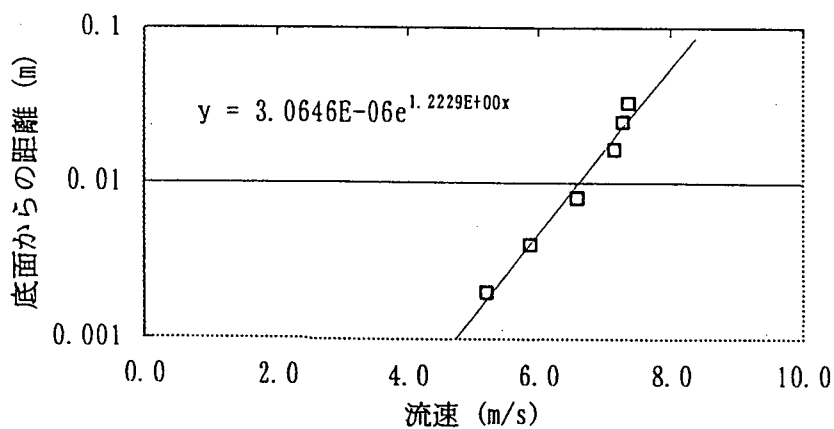
(a) $h_1=8\text{cm}$, $Z=6\text{m}$

No.4-4
 $h_1=8\text{ (cm)}$
 $Z=6.0\text{ (m)}$
 $Q=107.2\text{ (L/s)}$
 $G=8.0\text{ cm}$
 流入水深 6 (cm)
 v' 8.93 (m/s)
 Fr' 11.645



(b) $h_1=8\text{cm}$, $Z=5\text{m}$

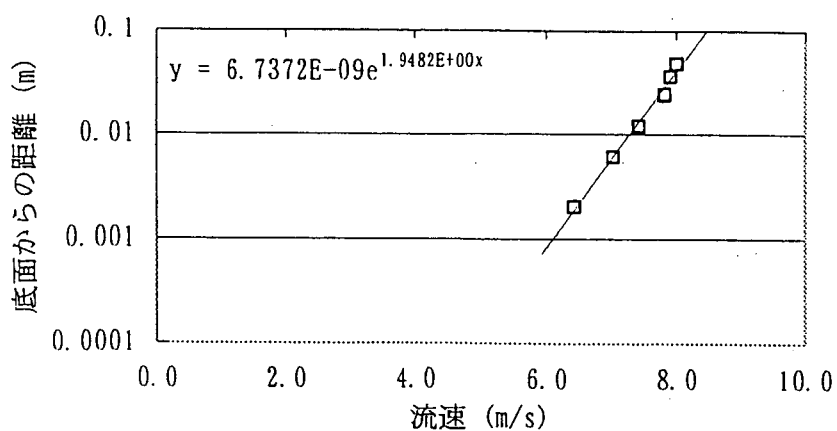
No.4-5
 $h_1=8\text{ (cm)}$
 $Z=5.0\text{ (m)}$
 $Q=89.0\text{ (L/s)}$
 $G=7.6\text{ cm}$
 流入水深 5.58 (cm)
 v' 7.97 (m/s)
 Fr' 10.784



(c) $h_1=8\text{cm}$, $Z=4\text{m}$

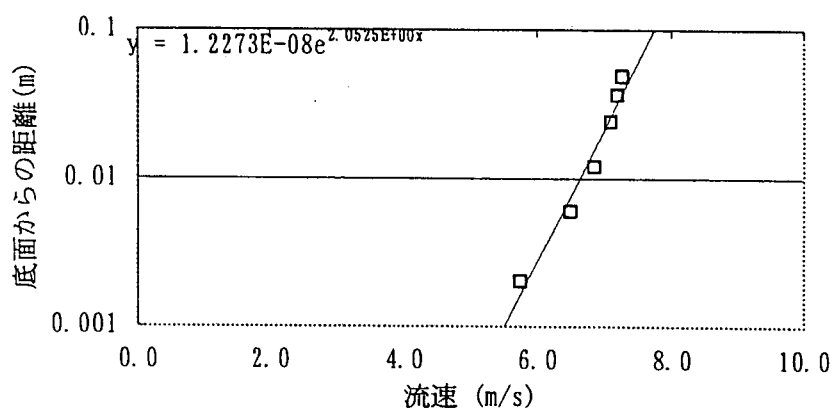
No.4-6
 $h_1=8\text{ (cm)}$
 $Z=4.0\text{ (m)}$
 $Q=68.0\text{ (L/s)}$
 $G=7.1\text{ (cm)}$
 流入水深 4.85 (cm)
 v' 7.01 (m/s)
 Fr 10.161

付図-3.11 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=8\text{ cm}$)



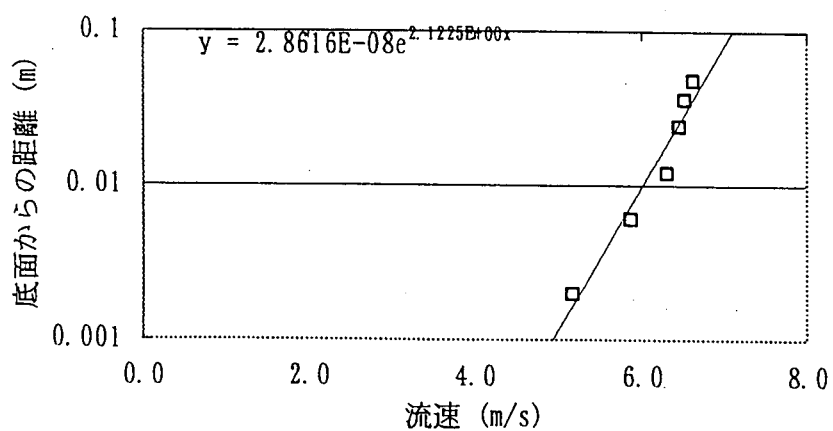
(a) $h_1=12\text{cm}$, $Z=6.0\text{m}$

No.4-7
 $h_1=12$ (cm)
 $Z=6.0$ (m)
 $Q=155.1$ (L/s)
 $G=11.7$ (cm)
 流入水深 9.76 (cm)
 v' 7.95 (m/s)
 Fr' 8.124



(b) $h_1=12\text{cm}$, $Z=5.0\text{m}$

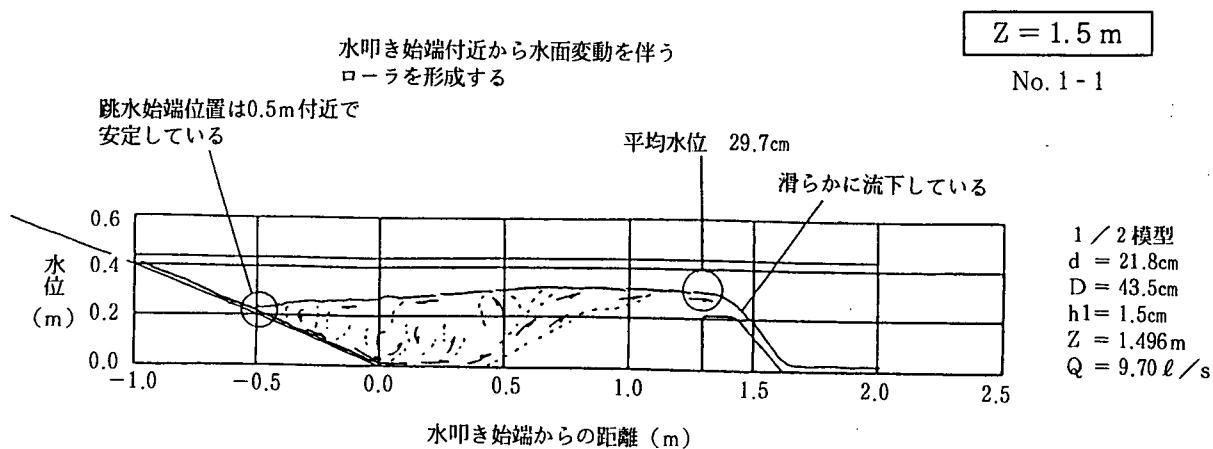
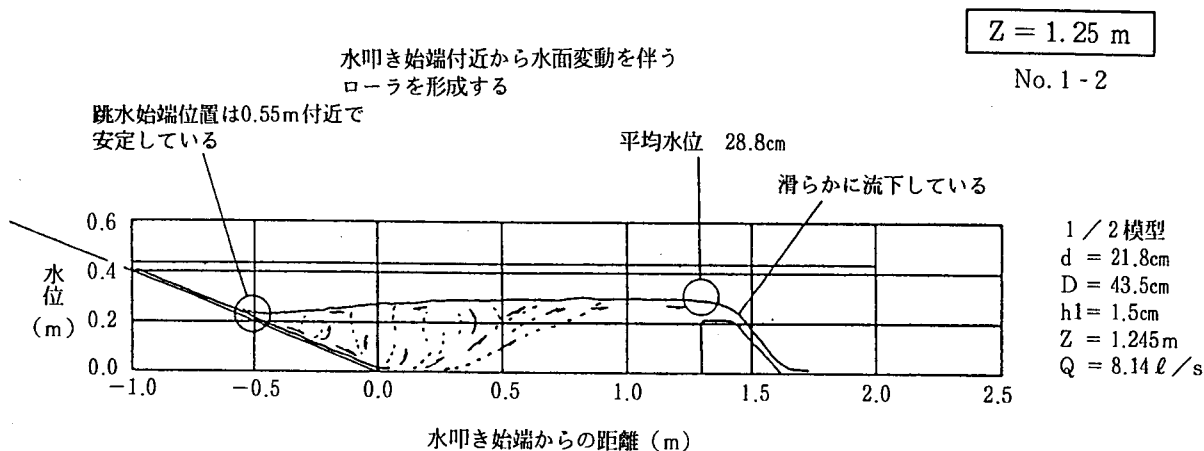
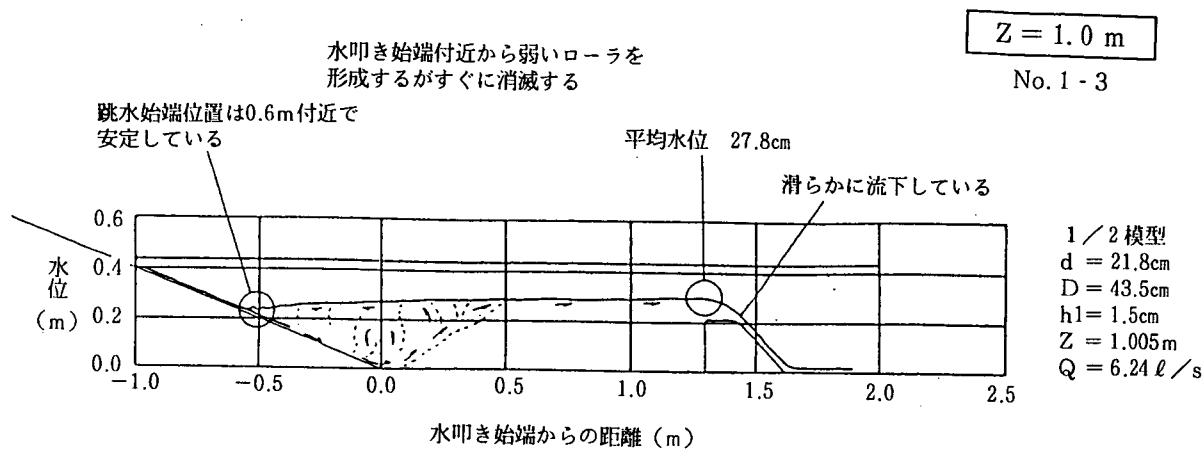
No.4-8
 $h_1=12$ (cm)
 $Z=5.0$ (m)
 $Q=131.3$ (L/s)
 $G=11.4$ (cm)
 流入水深 9.09 (cm)
 v' 7.22 (m/s)
 Fr' 7.652



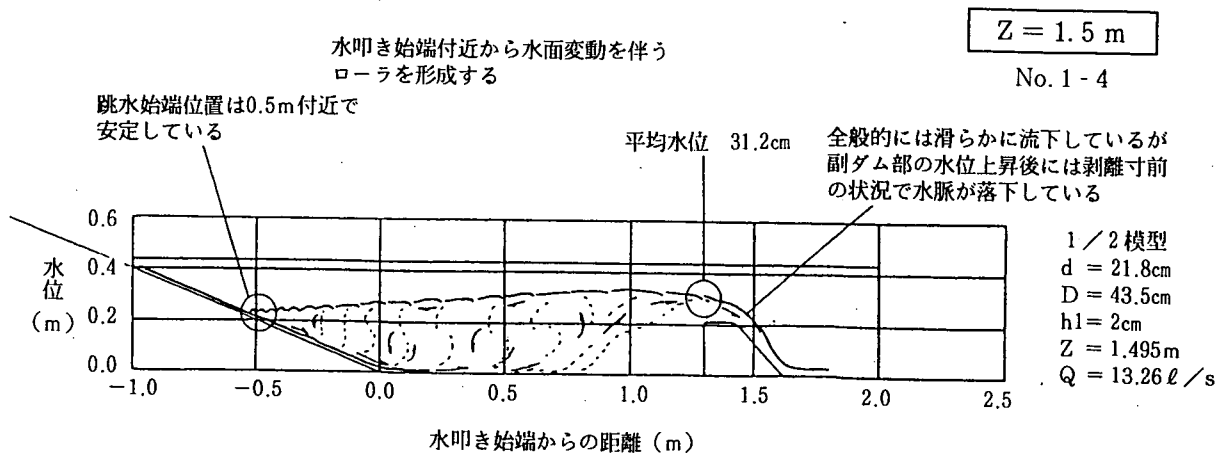
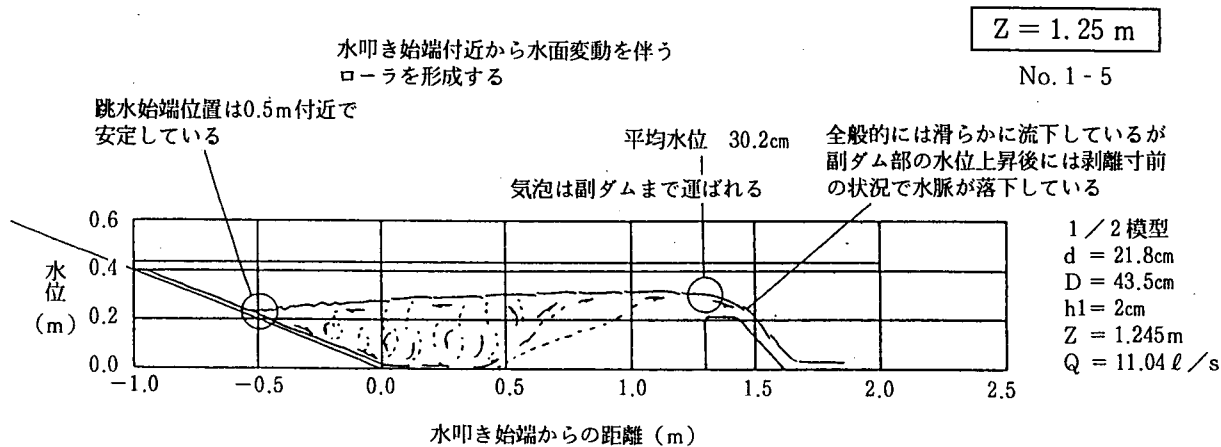
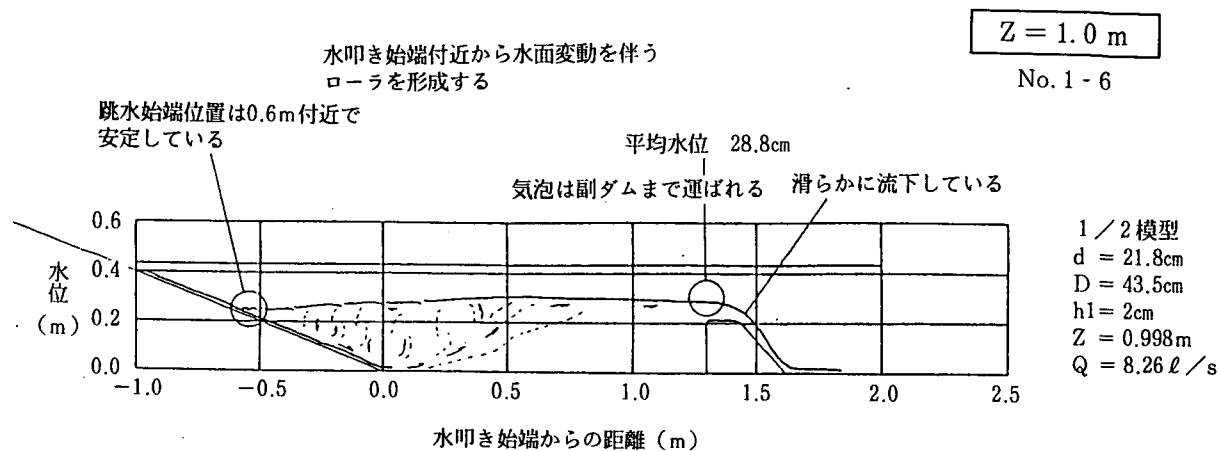
(c) $h_1=12\text{cm}$, $Z=4.0\text{m}$

No.4-9
 $h_1=12$ (cm)
 $Z=4.0$ (m)
 $Q=97.1$ (L/s)
 $G=10.4$ (cm)
 流入水深 7.48 (cm)
 v' 6.49 (m/s)
 Fr 7.58

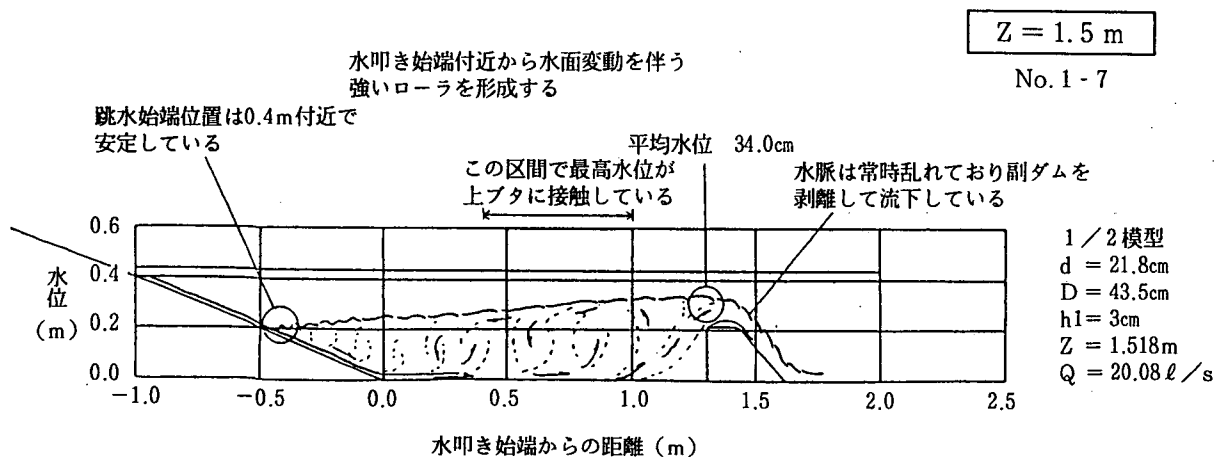
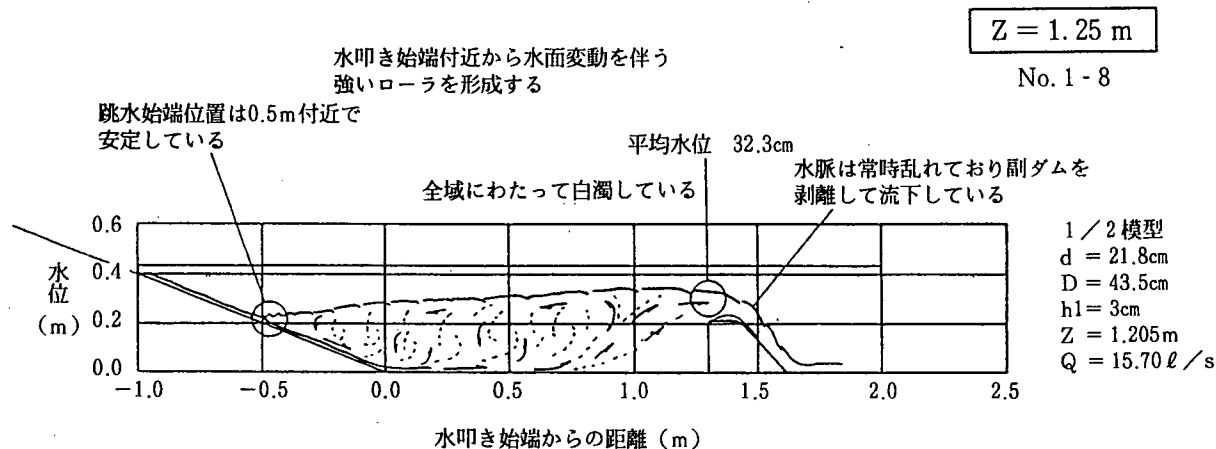
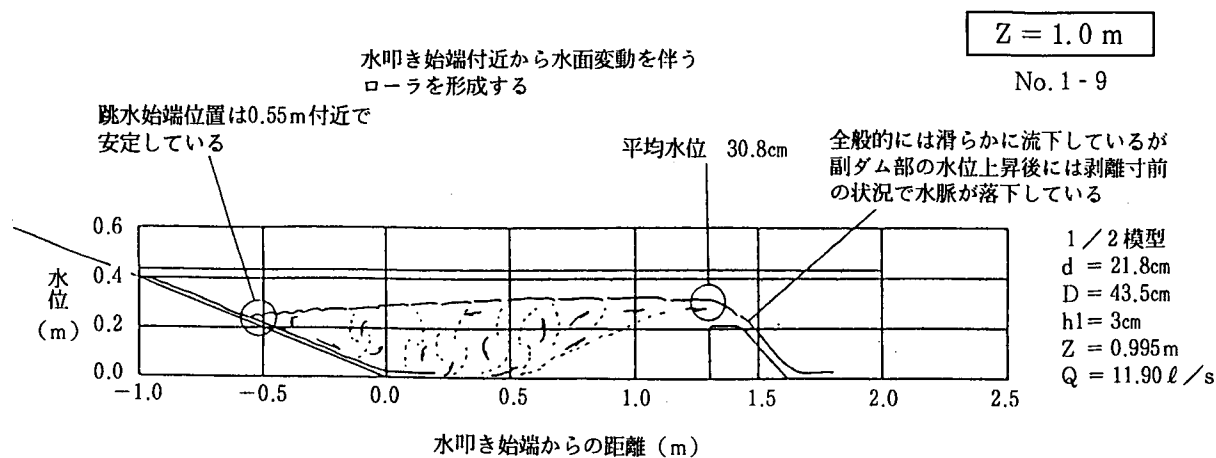
付図-3.12 流入水脈の流速分布 (1/2 模型、 $h_1=12\text{cm}$)



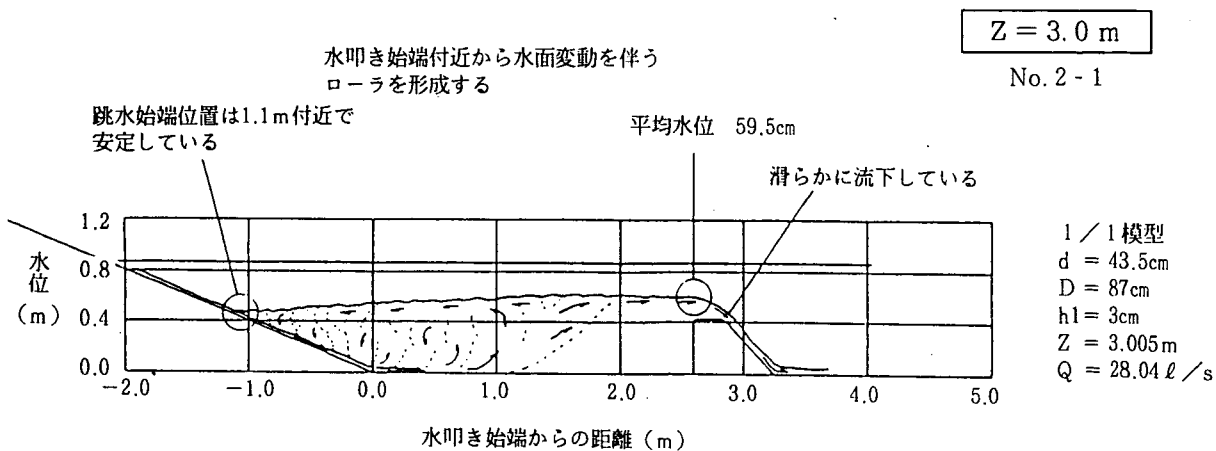
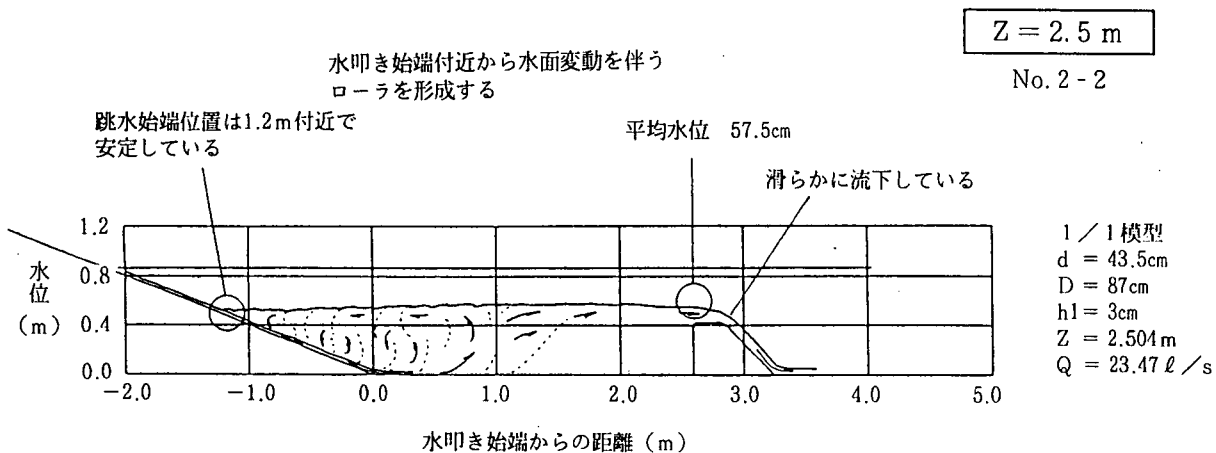
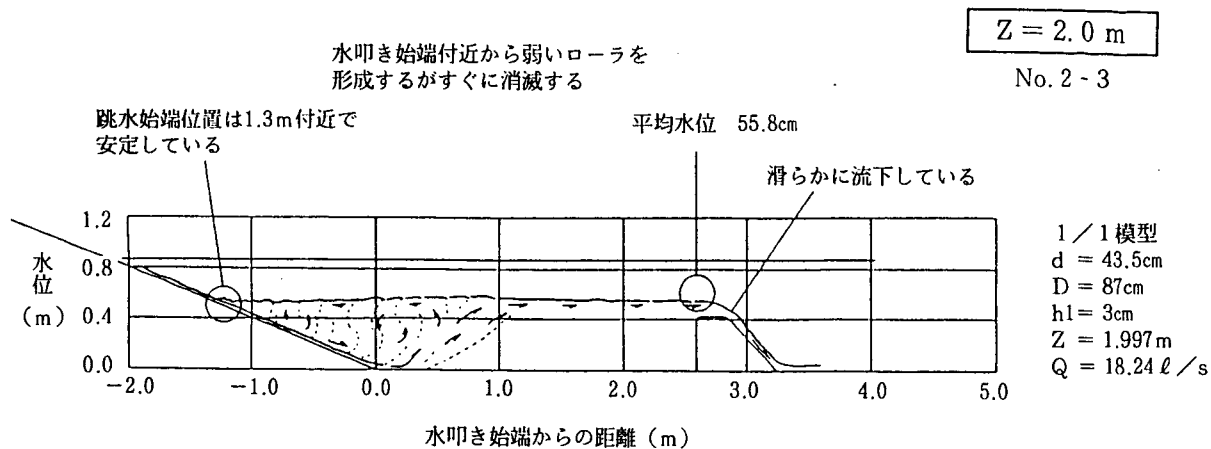
付図-3.13 1/2 模型副ダム原形状の流況図 (D=43.5cm、h1=1.5cm)



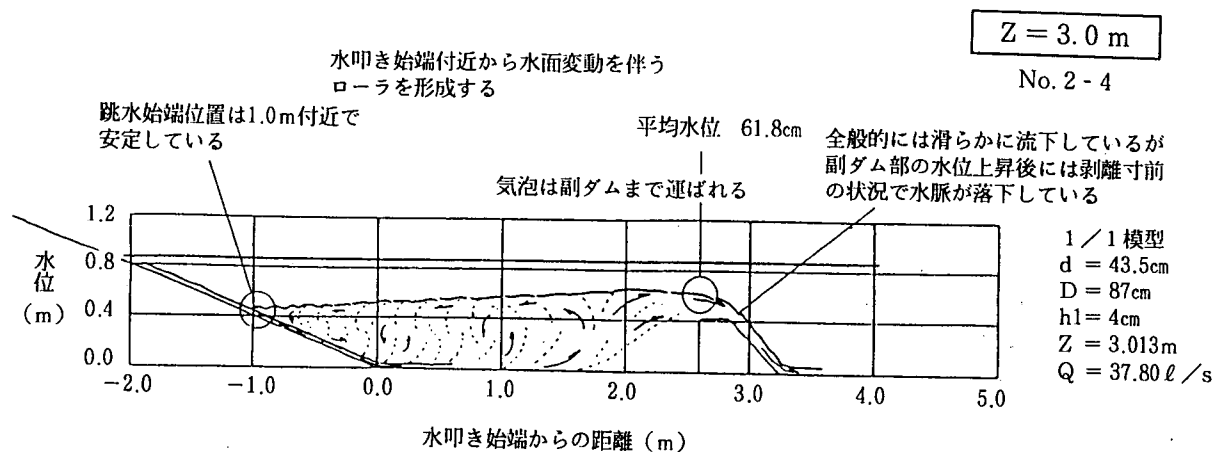
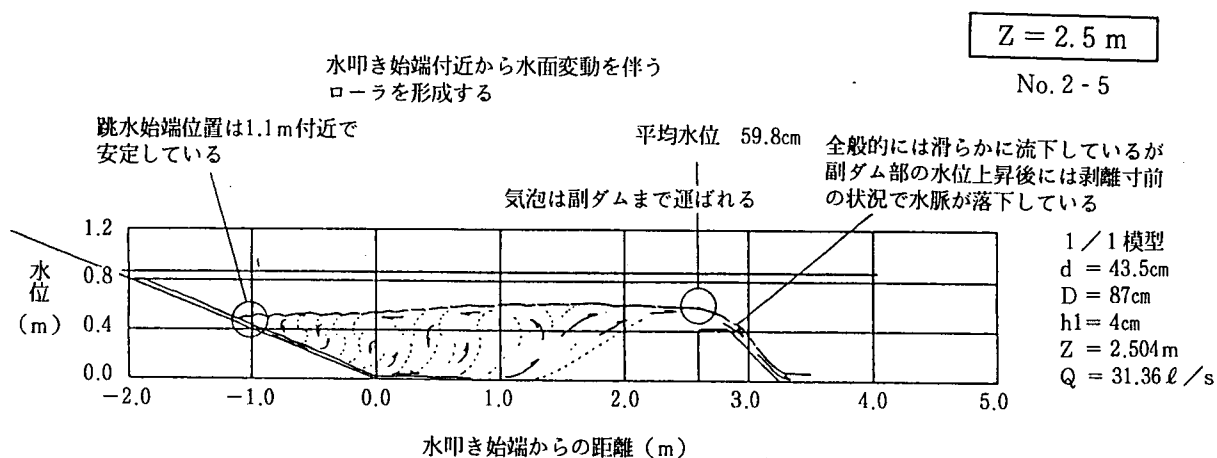
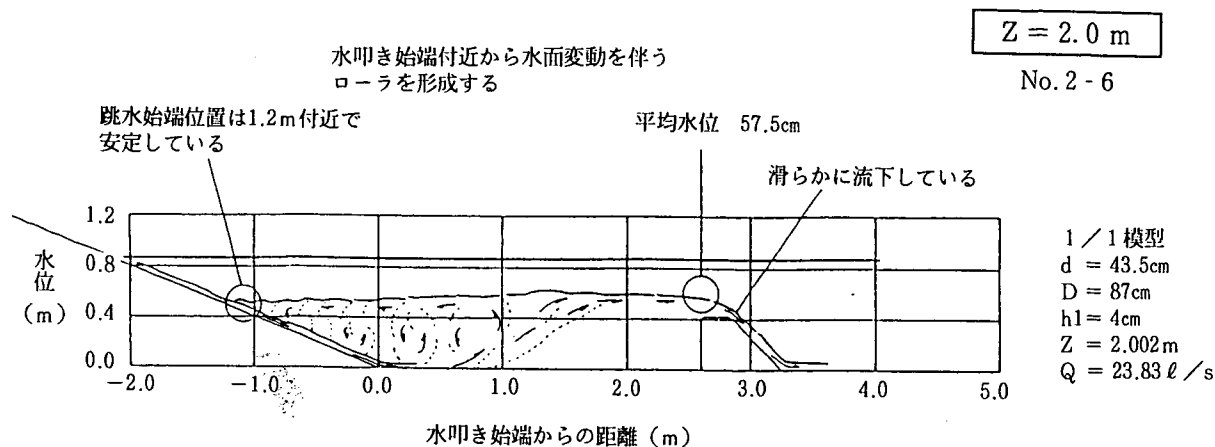
付図-3.14 1/2 模型副ダム原形状の流況図 (D=43.5cm、h1=2cm)



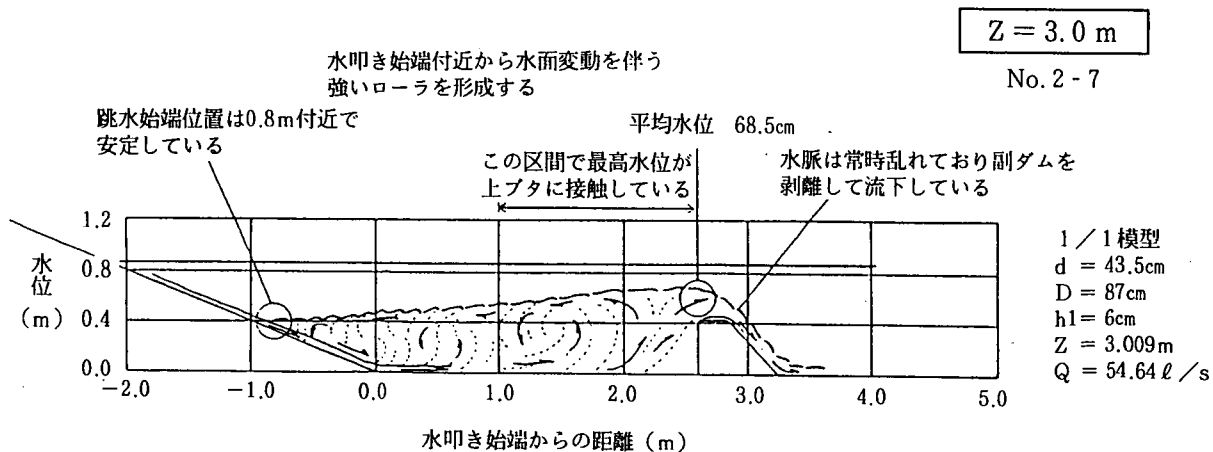
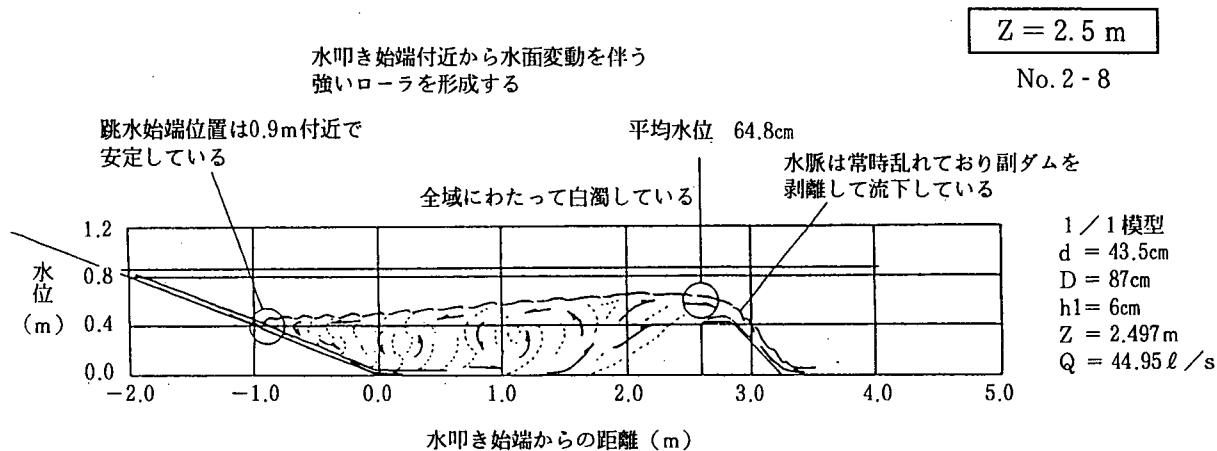
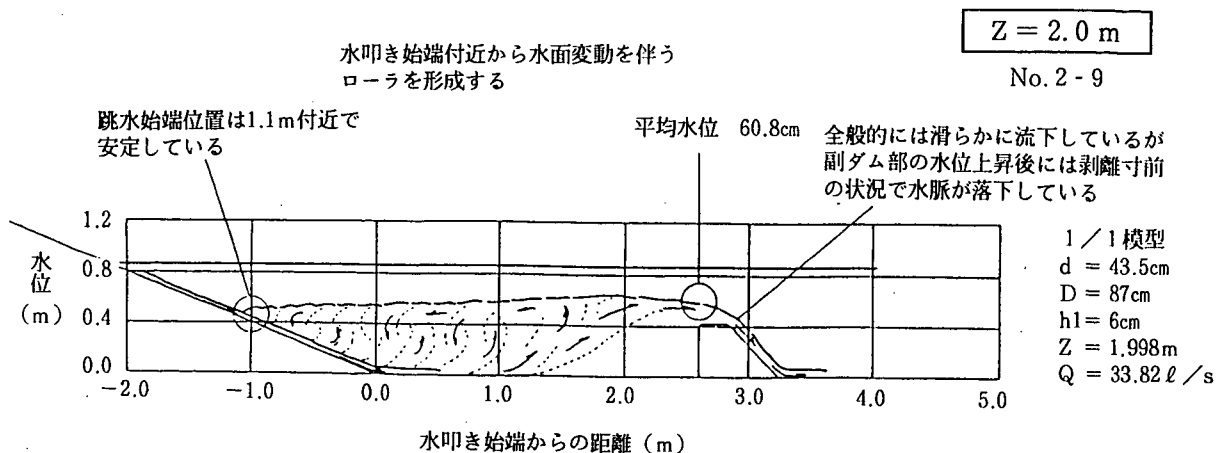
付図-3.15 1/2 模型副ダム原形状の流況図 (D=43.5cm、h1=3cm)



付図-3.16 1/1 模型副ダム原形状の流況図 (D=87cm、h1=3cm)

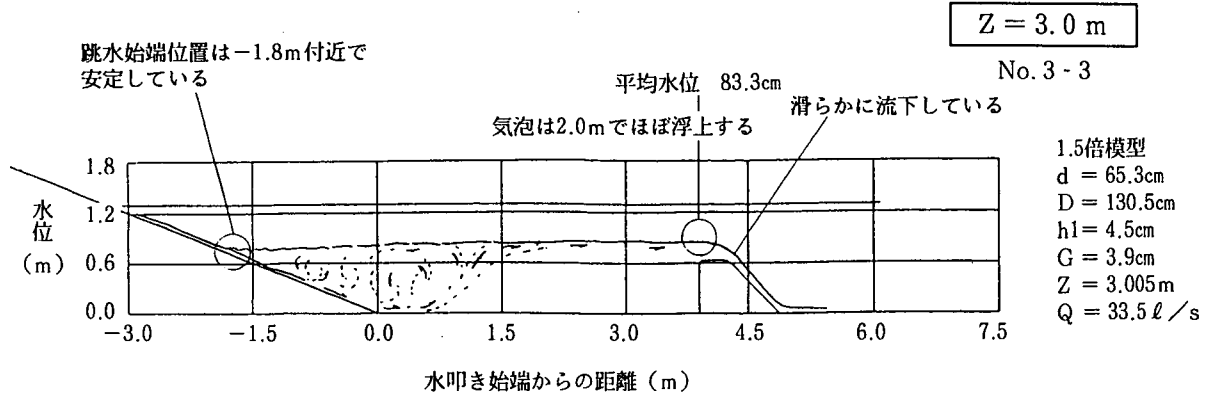


付図-3.17 1/1 模型副ダム原形状の流況図 (D=87cm、h1=4cm)

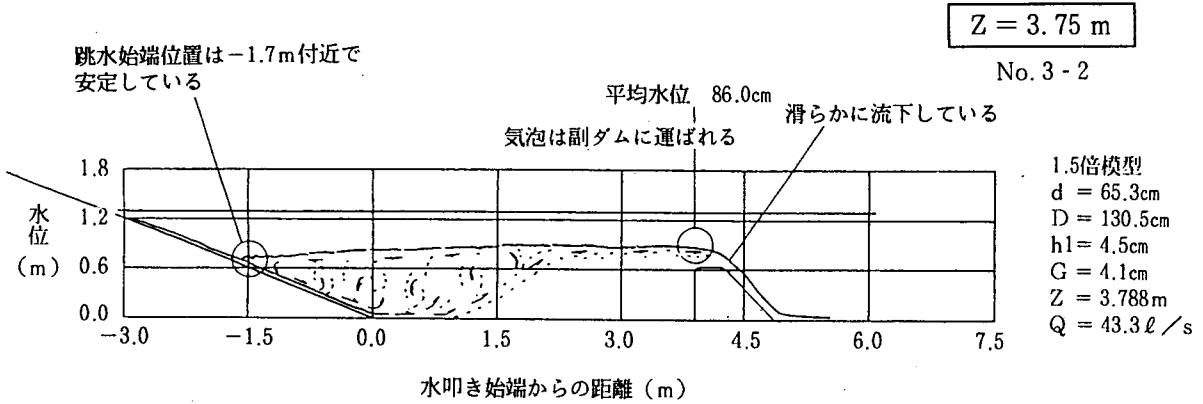


付図-3.18 1/1 模型副ダム原形状の流況図 (D=87cm、h1=6cm)

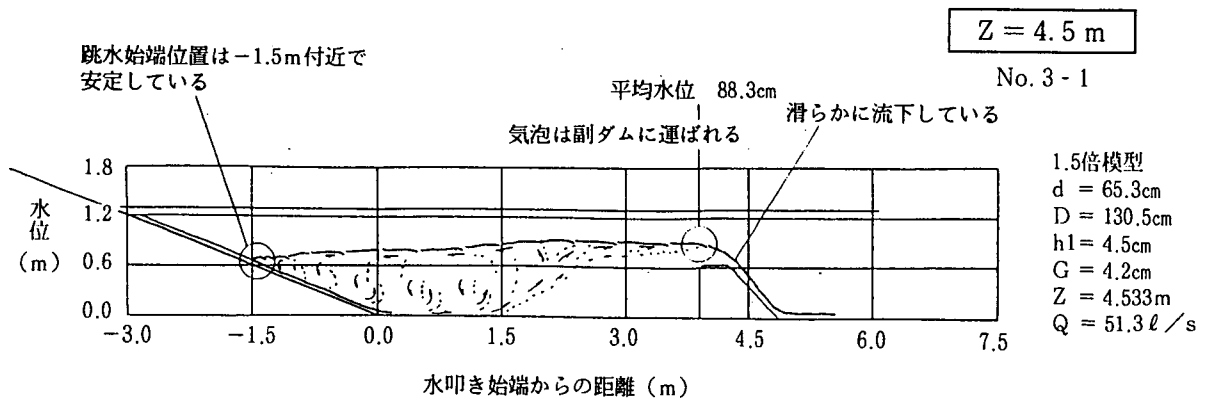
水叩き始端付近から弱いローラを
形成するがすぐに消滅する



水叩き始端付近から弱いローラを
形成するがすぐに消滅する



水叩き始端付近から水面変動を伴う
ローラを形成する

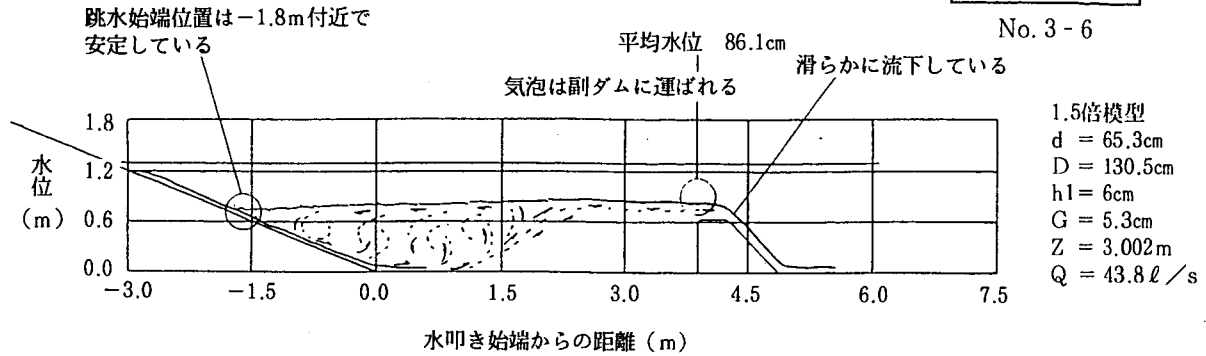


付図-3.19 3/2 模型流況図 (h1=4.5cm)

水叩き始端付近から水面変動を伴う
ローラを形成する

$Z = 3.0 \text{ m}$

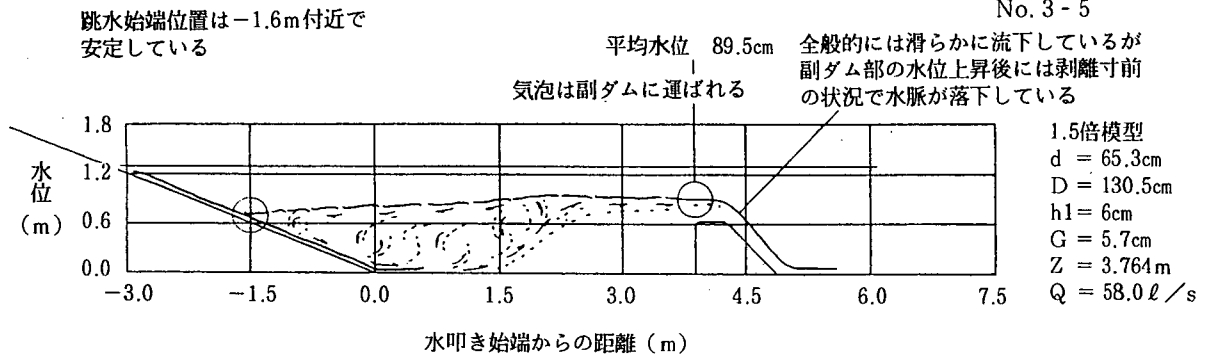
No. 3-6



水叩き始端付近から水面変動を伴う
ローラを形成する

$Z = 3.75 \text{ m}$

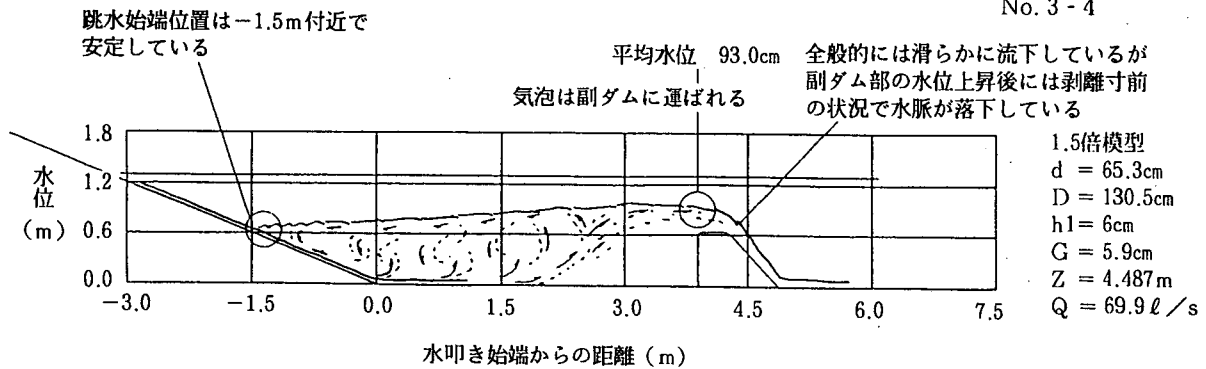
No. 3-5



水叩き始端付近から水面変動を伴う
ローラを形成する

$Z = 4.5 \text{ m}$

No. 3-4

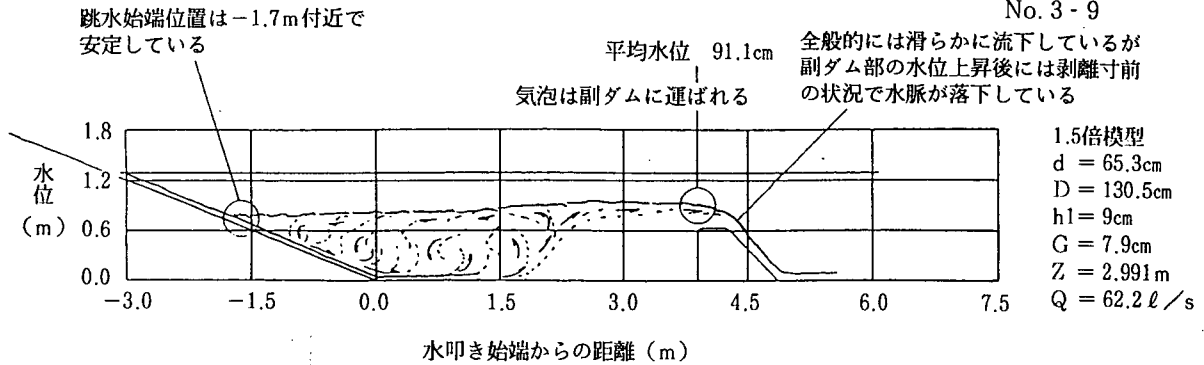


付図-3.20 3/2 模型流況図 ($h_1 = 6 \text{ cm}$)

水叩き始端付近から水面変動を伴う
ローラを形成する

$Z = 3.0 \text{ m}$

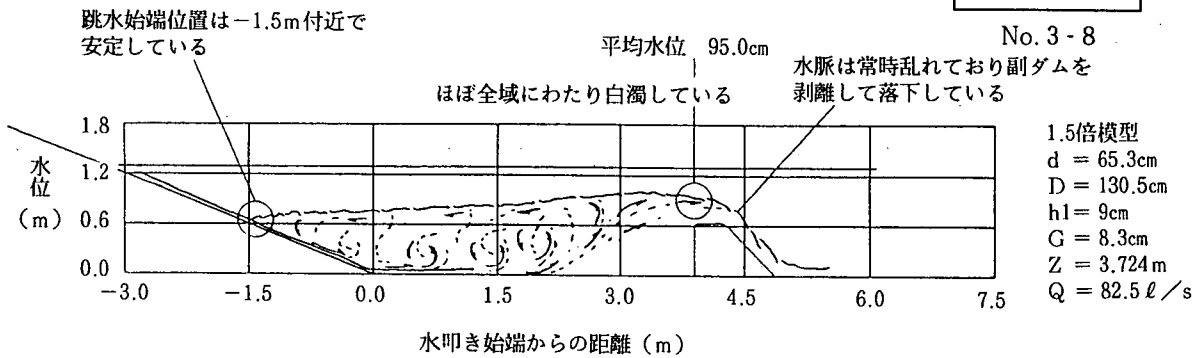
No. 3-9



水叩き始端付近から水面変動を伴う
ローラを形成する

$Z = 3.75 \text{ m}$

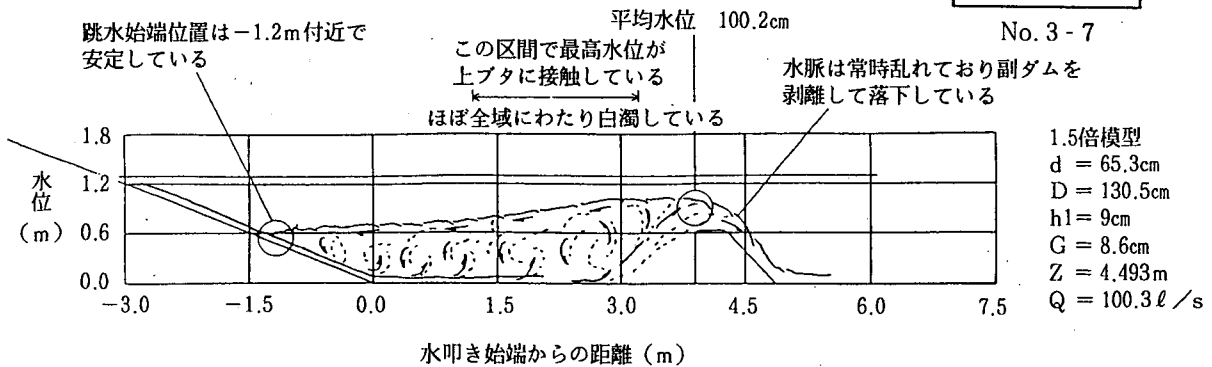
No. 3-8



水叩き始端付近から水面変動を伴う
強いローラを形成する

$Z = 4.5 \text{ m}$

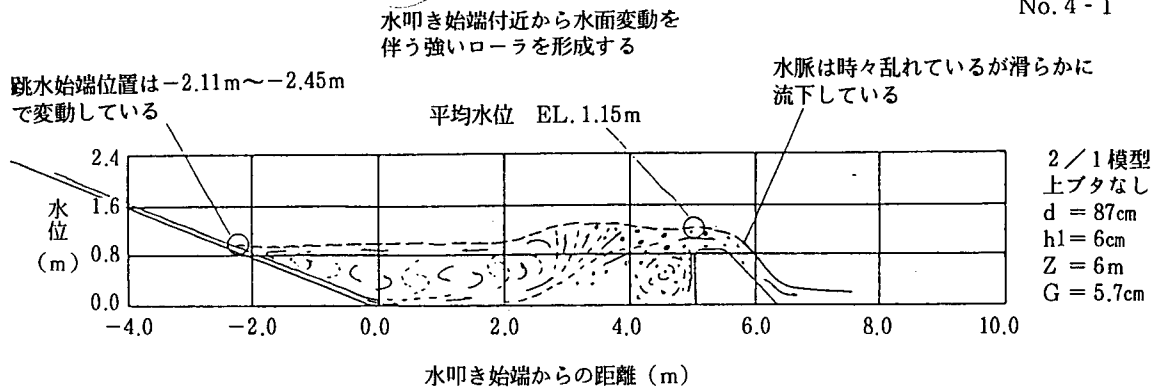
No. 3-7



付図-3.21 3/2 模型流況図 ($h_1 = 9 \text{ cm}$)

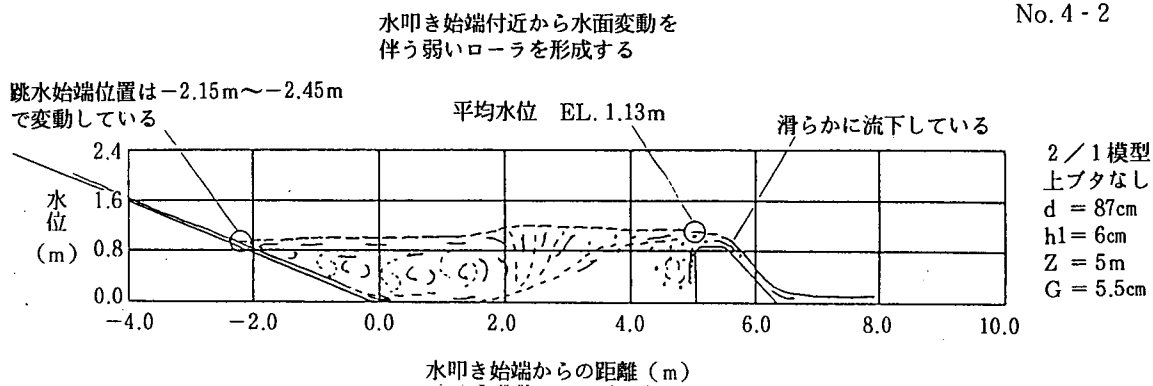
$Z = 6.0 \text{ m}$

No. 4 - 1



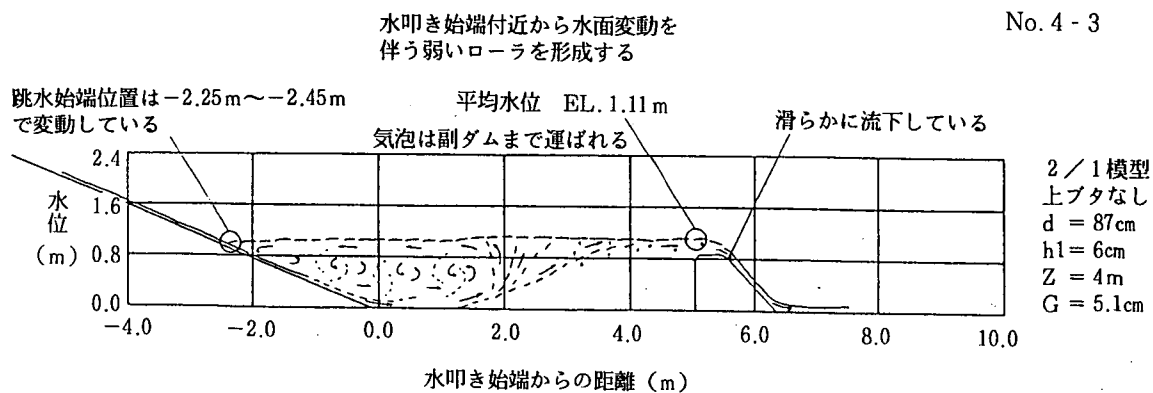
$Z = 5.0 \text{ m}$

No. 4 - 2

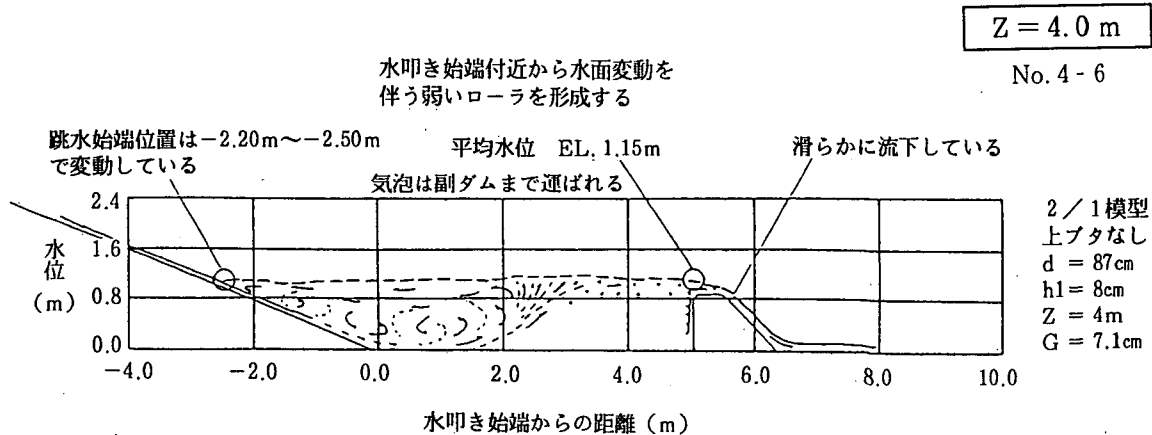
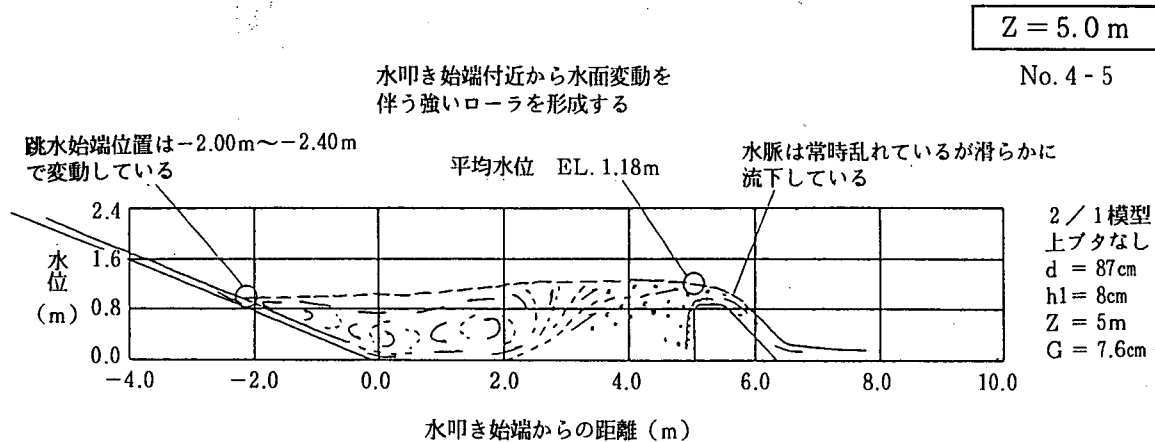
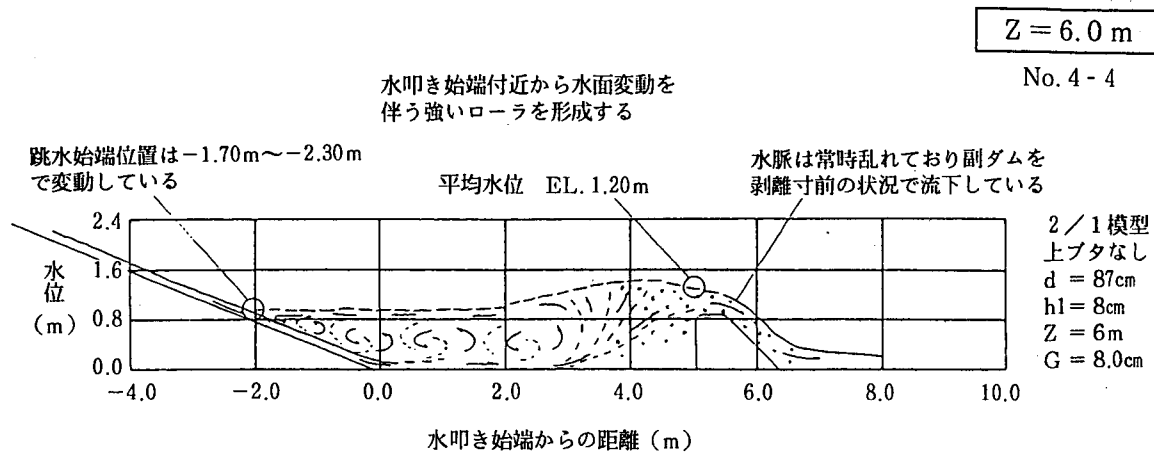


$Z = 4.0 \text{ m}$

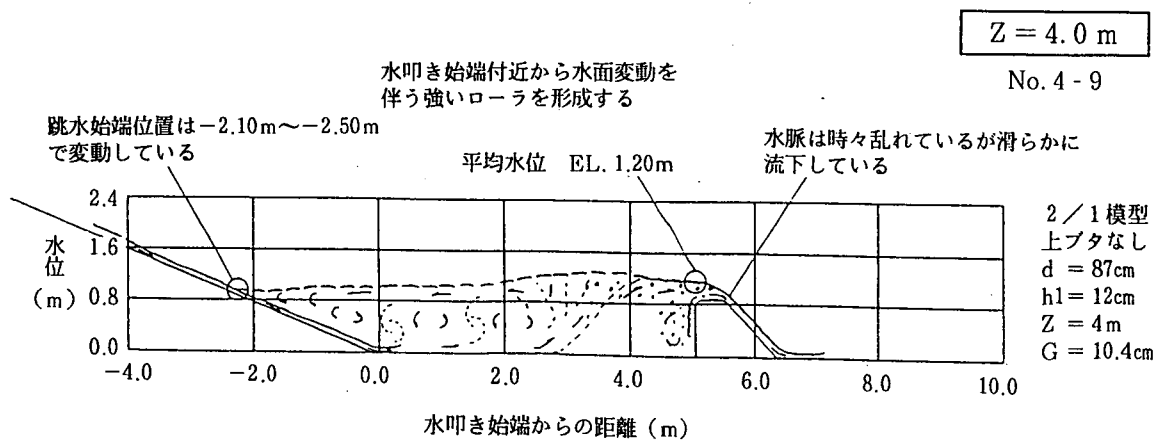
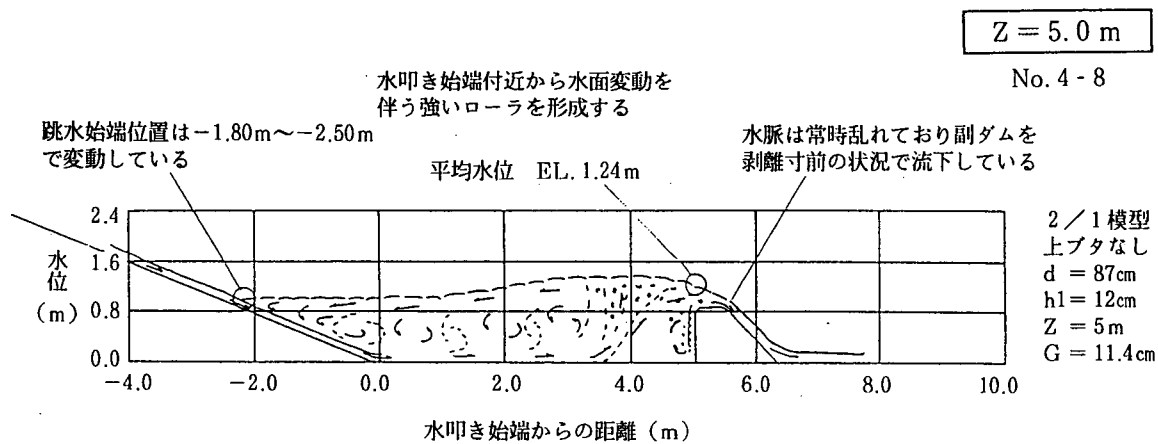
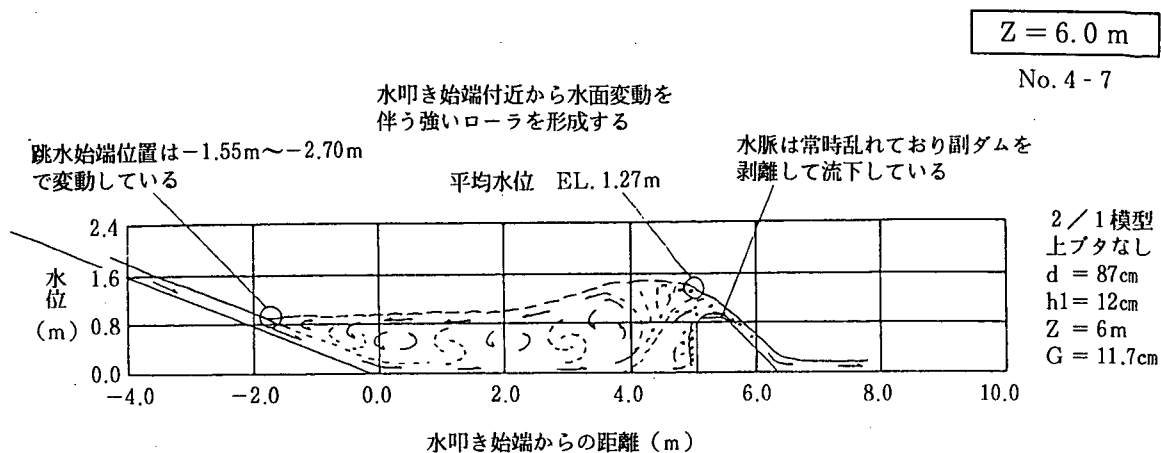
No. 4 - 3



付図-3.22 2/1 模型流況図 ($h_1 = 6 \text{ cm}$)



付図-3.23 2/1 模型流況図 (h1=8cm)

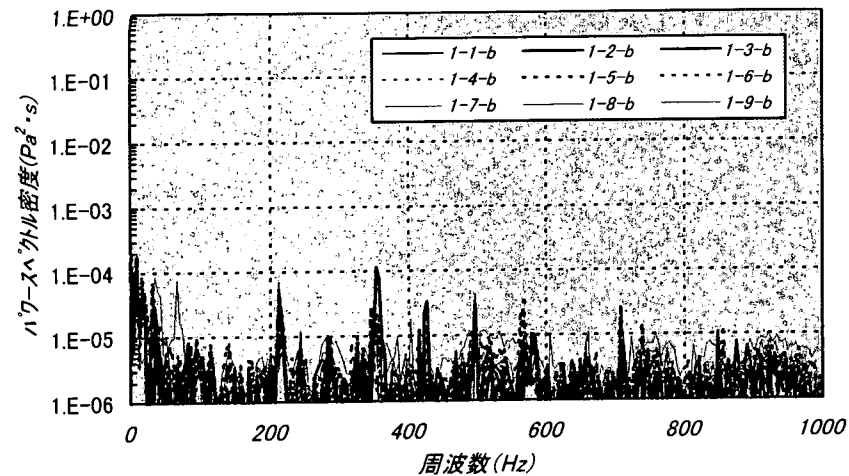


付図-3.24 2/1 模型流況図 (h1=12cm)

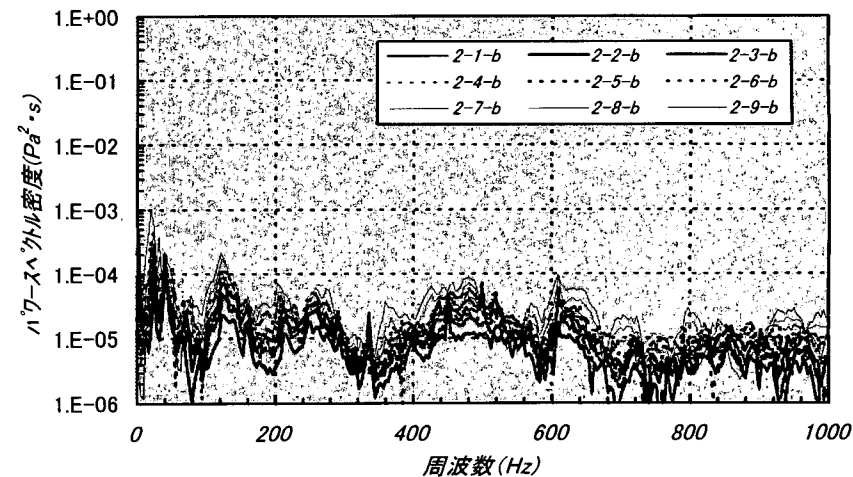
付表-4.1 天井を設けた場合のトンネル出口の測定音圧

実験No.	縮尺	天井の有無	流入水脈の水利条件							始端部音圧		音源の出力		変換効率 α %	トンネル出口音圧	
			鉄管厚 h_1 cm	流入水脈厚 h' cm	水位 Z m	流量 Q l/s	流速 v m/s	流入エネルギー E/B J/(m $\cdot$ s)	フルード数 Fr	圧力 Prms Pa	レベル L_p dB	出力 W/B J/(m $\cdot$ s)	レベル L_w dB		圧力 Prms Pa	レベル L_p dB
1-1-b	1/2	あり	1.5	1.29	1.50	9.7	3.76	343	10.6						0.324	84.2
1-2-b	1/2	あり	1.5	1.15	1.25	8.1	3.52	251	10.5						0.236	81.4
1-3-b	1/2	あり	1.5	1.03	1.00	6.2	3.01	140	9.5						0.155	77.8
1-4-b	1/2	あり	2.0	1.57	1.50	13.3	4.24	597	10.8						0.521	88.3
1-5-b	1/2	あり	2.0	1.48	1.25	11.0	3.72	380	9.8						0.385	85.7
1-6-b	1/2	あり	2.0	1.30	1.00	8.3	3.19	211	8.9						0.237	81.5
1-7-b	1/2	あり	3.0	2.33	1.50	20.1	4.31	935	9.0						0.691	90.8
1-8-b	1/2	あり	3.0	2.14	1.25	15.7	3.67	528	8.0						0.470	87.4
1-9-b	1/2	あり	3.0	1.87	1.00	11.9	3.18	301	7.4						0.291	83.3
2-1-b	1.0	あり	3.0	2.44	3.00	28.0	5.74	2,304	11.7						0.886	92.9
2-2-b	1.0	あり	3.0	2.31	2.50	23.5	5.09	1,520	10.7						0.728	91.2
2-3-b	1.0	あり	3.0	2.00	2.00	18.2	4.55	942	10.3						0.488	87.7
2-4-b	1.0	あり	4.0	3.44	3.00	37.8	5.49	2,853	9.5						1.096	94.8
2-5-b	1.0	あり	4.0	3.03	2.50	31.4	5.18	2,108	9.5						0.943	93.5
2-6-b	1.0	あり	4.0	2.53	2.00	23.8	4.70	1,316	9.4						0.678	90.6
2-7-b	1.0	あり	6.0	4.76	3.00	54.6	5.74	4,490	8.4						1.507	97.5
2-8-b	1.0	あり	6.0	4.36	2.50	45.0	5.16	2,996	7.9						1.148	95.2
2-9-b	1.0	あり	6.0	3.65	2.00	33.8	4.63	1,812	7.7						0.788	91.9
3-1-b	1.5	あり	4.5	3.39	4.50	51.5	7.60	7,429	13.2						1.140	95.1
3-2-b	1.5	あり	4.5	3.22	3.75	43.3	6.72	4,894	12.0						0.933	93.4
3-3-b	1.5	あり	4.5	2.86	3.00	33.5	5.86	2,873	11.1						0.628	89.9
3-4-b	1.5	あり	6.0	4.89	4.50	69.4	7.10	8,737	10.3						1.513	97.6
3-5-b	1.5	あり	6.0	4.36	3.75	57.6	6.61	6,283	10.1						1.260	96.0
3-6-b	1.5	あり	6.0	3.79	3.00	43.8	5.78	3,656	9.5						0.812	92.2
3-7-b	1.5	あり	9.0	6.84	4.50	100.4	7.34	13,520	9.0						2.192	100.8
3-8-b	1.5	あり	9.0	6.30	3.75	82.6	6.56	8,874	8.3						1.571	97.9
3-9-b	1.5	あり	9.0	5.63	3.00	62.1	5.52	4,722	7.4						1.005	94.0
4-1-b	2	あり	6	4.68	6.00	78.8	8.42	13,963	12.4						0.915	93.2
4-2-b	2	あり	6	4.12	5.00	66.2	8.03	10,682	12.6						0.707	91.0
4-3-b	2	あり	6	3.68	4.00	50.6	6.88	5,979	11.4						0.554	88.8
4-4-b	2	あり	8	6.00	6.00	107.4	8.95	21,508	11.7						1.303	96.3
4-5-b	2	あり	8	5.58	5.00	89.4	8.01	14,342	10.8						1.092	94.7
4-6-b	2	あり	8	4.85	4.00	67.2	6.93	8,063	10.0						0.749	91.5
4-7-b	2	あり	12	9.76	6.00	156	7.99	24,909	8.2						1.791	99.0
4-8-b	2	あり	12	9.09	5.00	128.4	7.06	16,012	7.5						1.234	95.8
4-9-b	2	あり	12	7.48	4.00	94.5	6.32	9,427	7.4						0.844	92.5

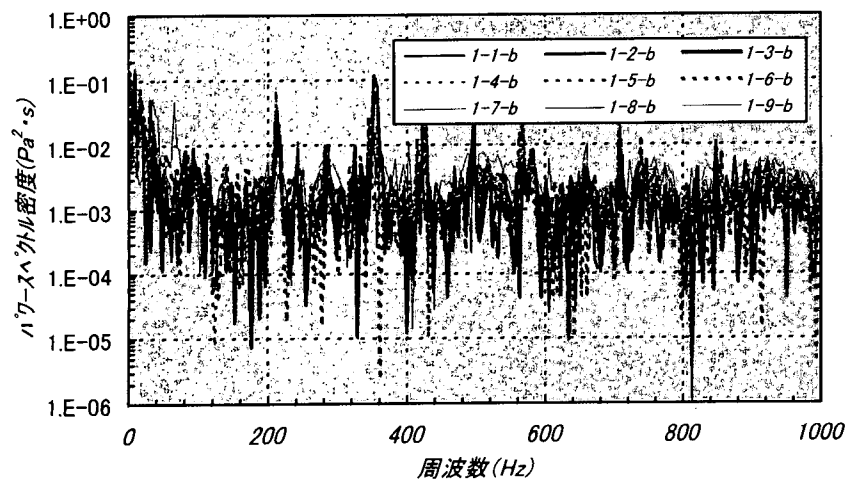
注) 1. 第4章における実験の測定値を示したものである。



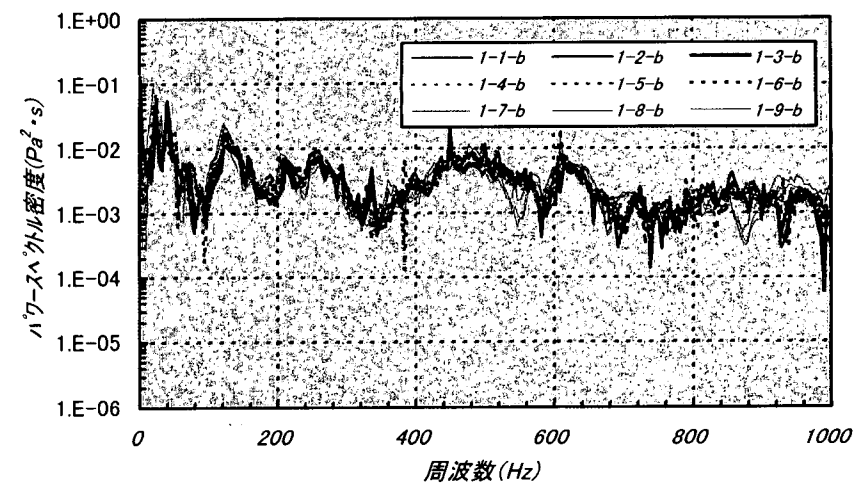
付図-4.1a 0.5倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



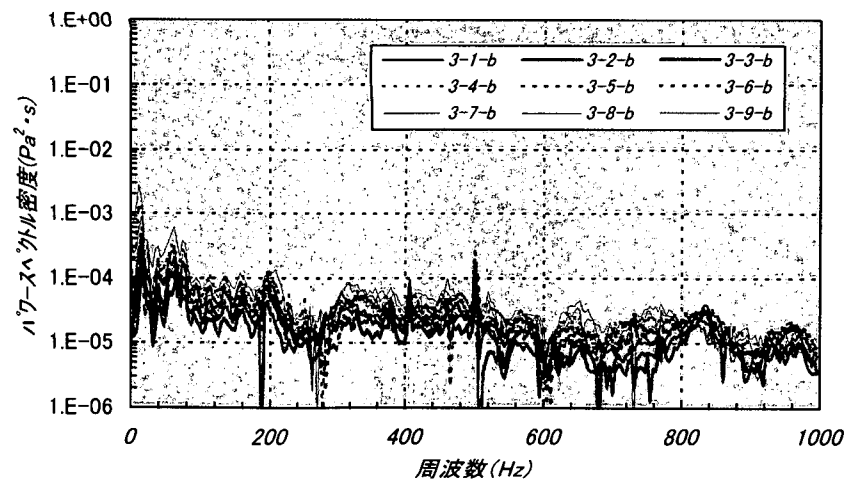
付図-4.2a 1倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



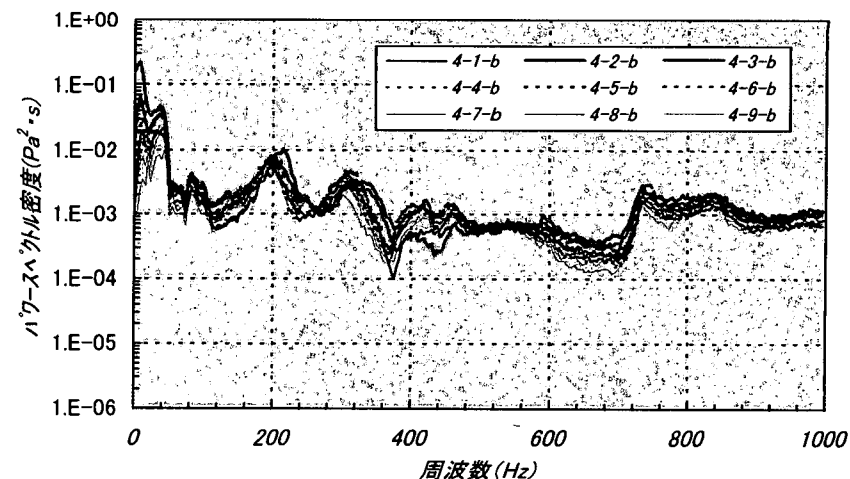
付図-4.1b 0.5倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



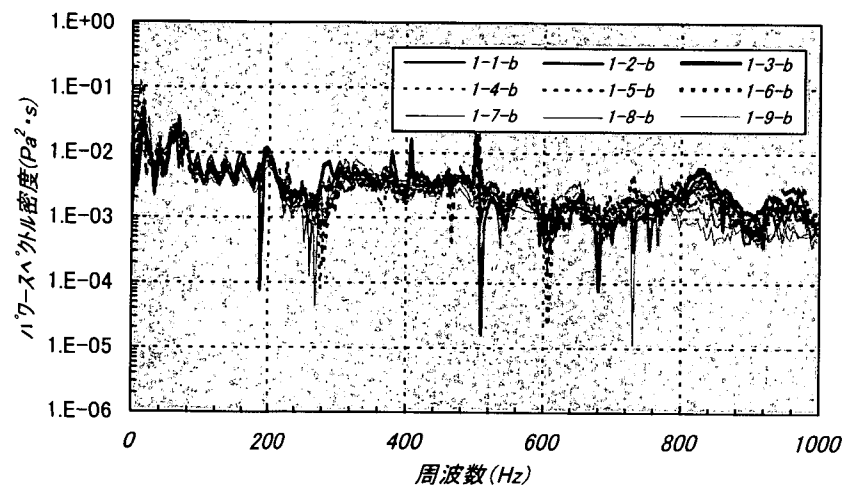
付図-4.2b 0.5倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



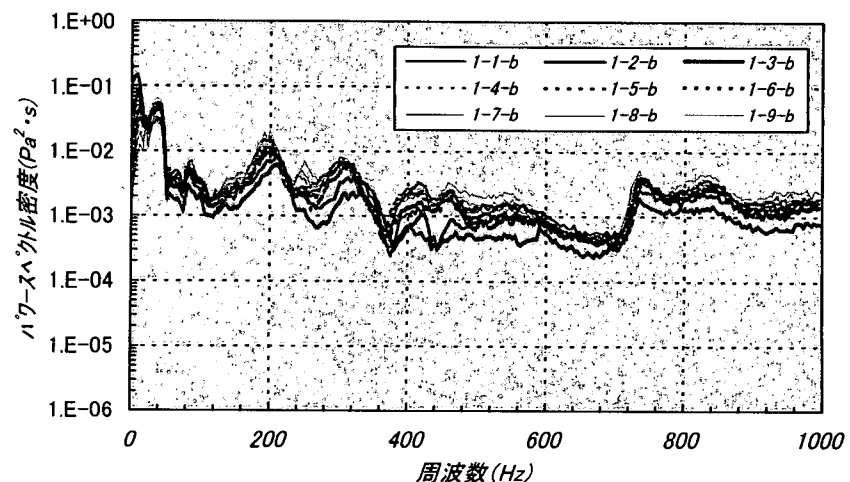
付図-4.3a 1.5倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



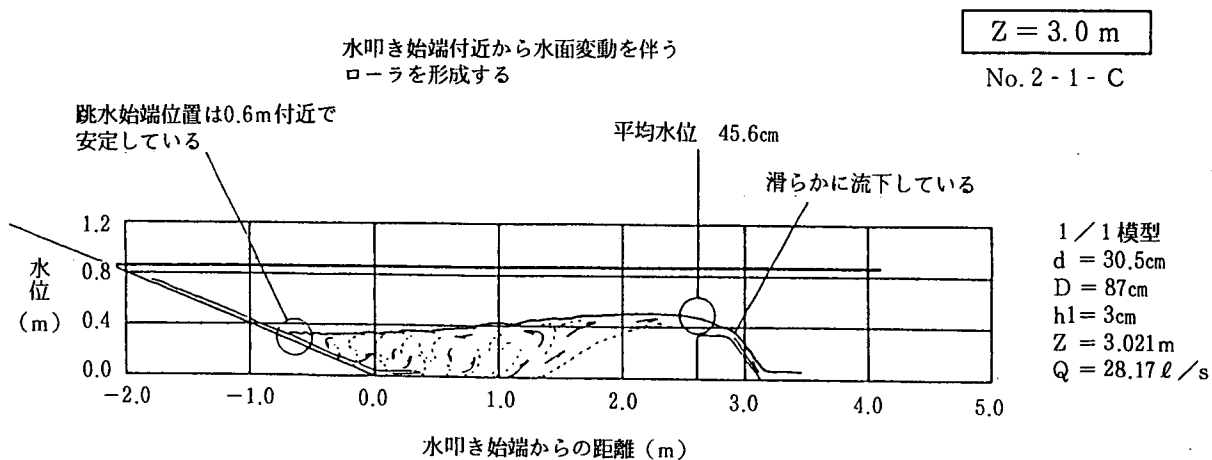
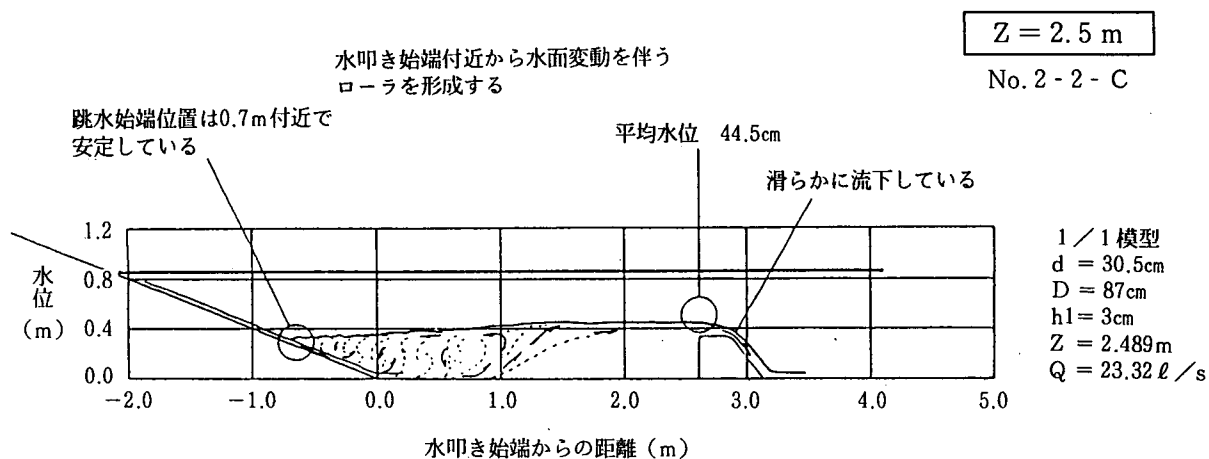
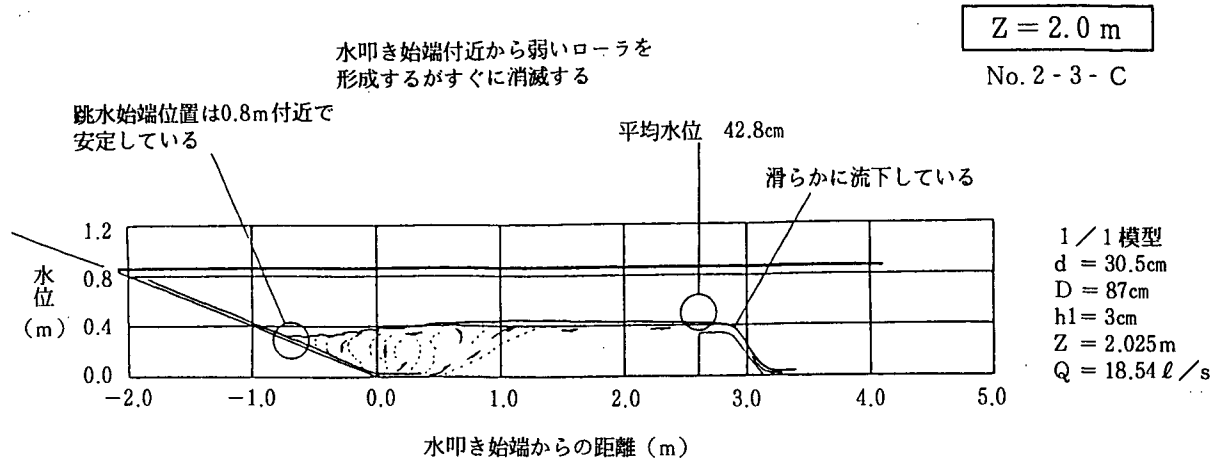
付図-4.4a 2倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



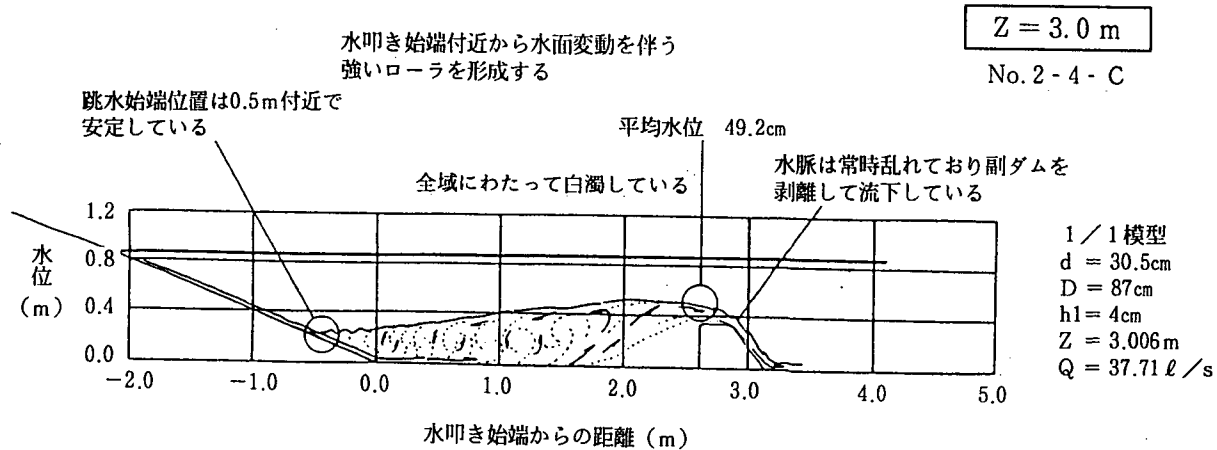
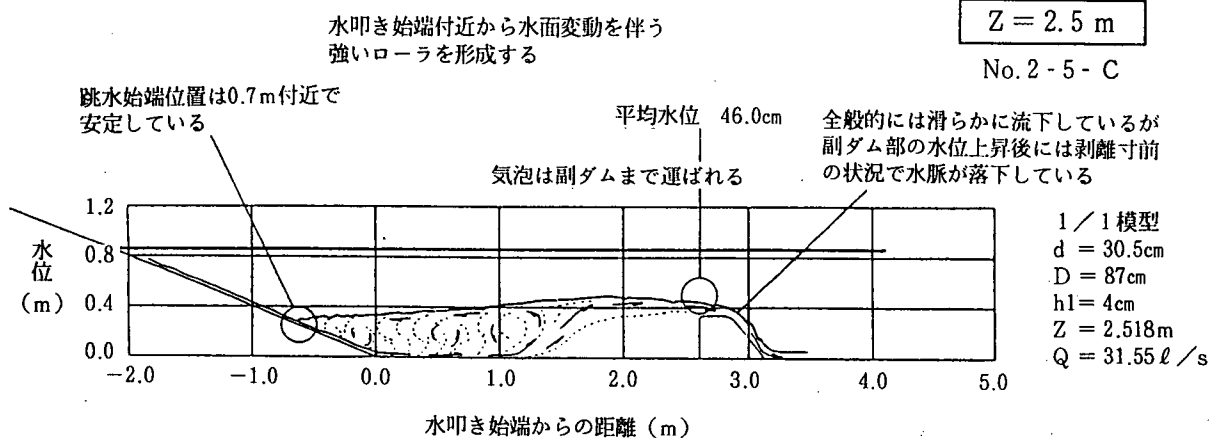
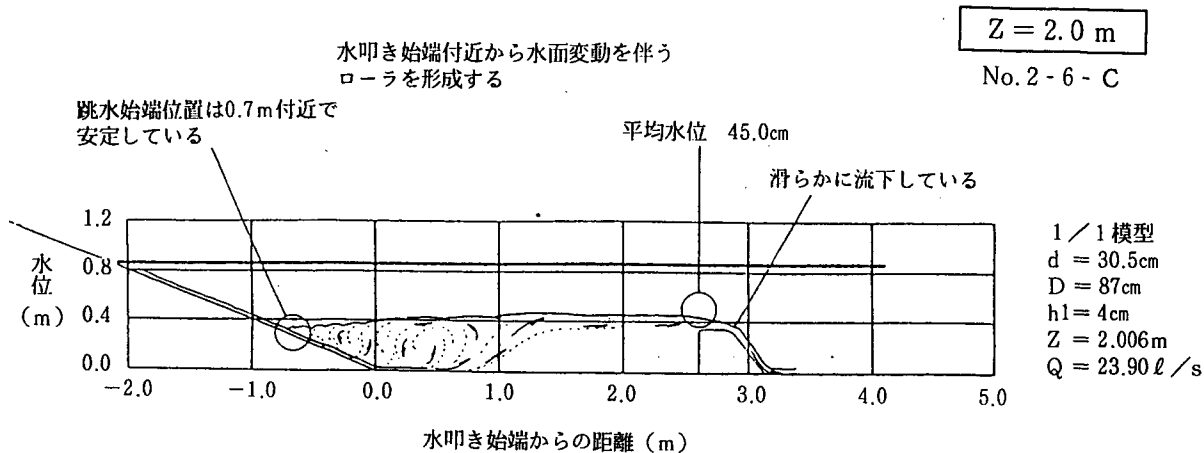
付図-4.3b 1.5倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



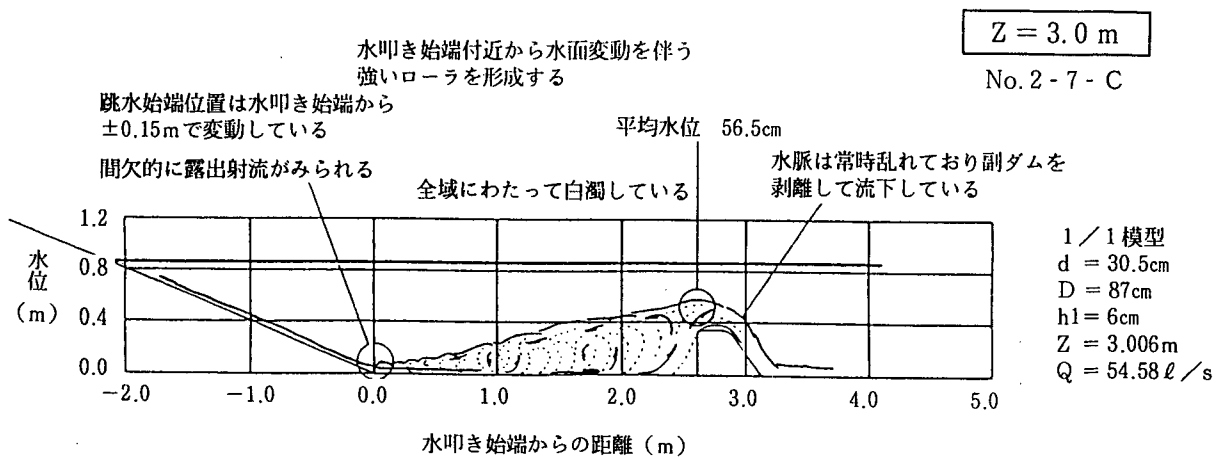
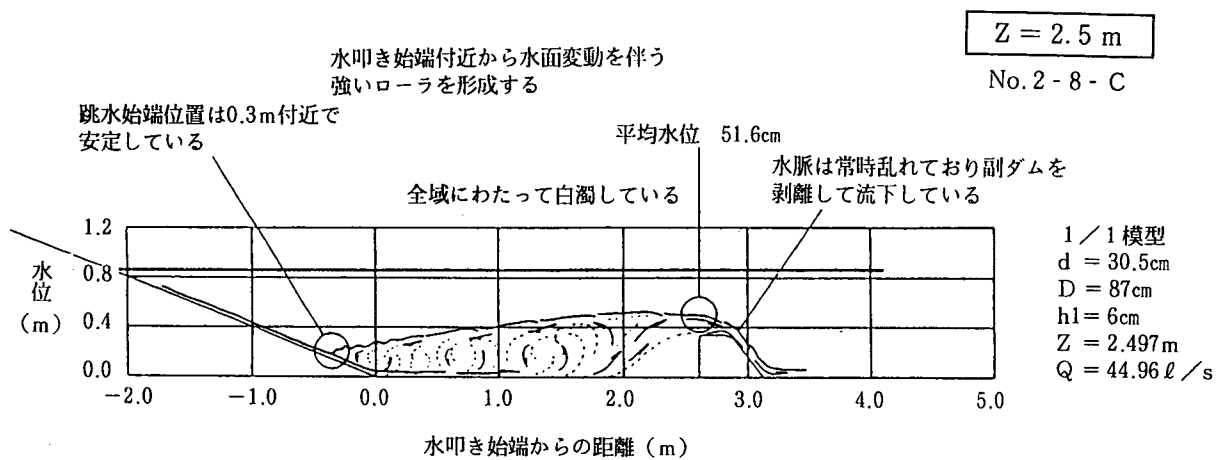
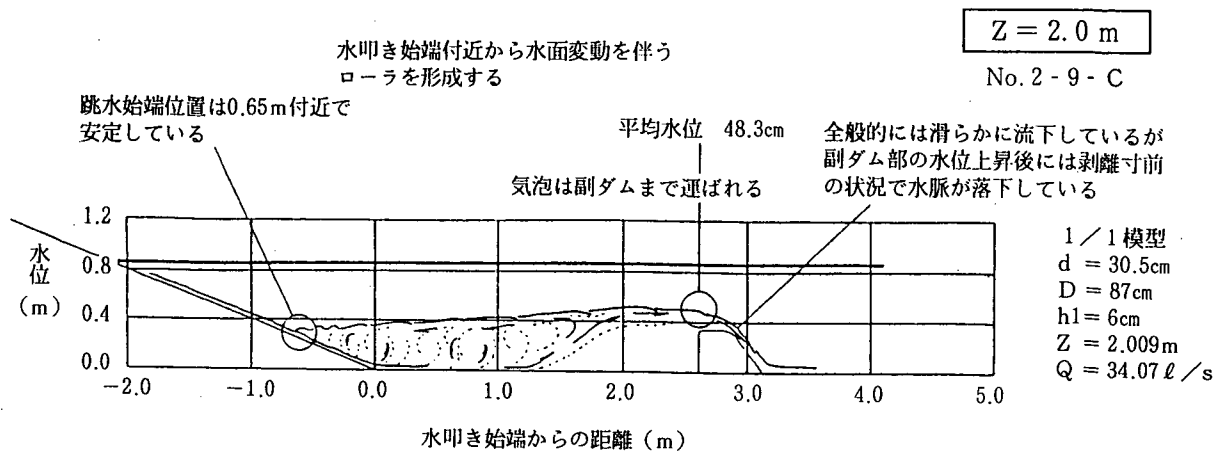
付図-4.4b 2倍模型観測音(給気管直上)のパワースペクトル分布



付図-4.5 1/1 模型副ダム比較形状の流況図 ($D=87 \text{ cm}$ 、 $h_1=3 \text{ cm}$)



付図-4.6 1/1 模型副ダム比較形状の流況図 (D=87cm、h₁=4cm)



付図-4.7 1/1 模型副ダム比較形状の流況図 (D=87cm、h₁ = 6 cm)