

土木研究所報告

第 185 号

目 次

茨城県, 五浦海岸 (岩石海岸) の 地形学的特徴と侵食実態	宇多高明 山本幸次	1
越流式ゲートの越流水膜振動特性	角 哲也 大久保精二 中島康夫	17

平成 3 年 3 月

建設省土木研究所

Copyright © (1991) 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。

茨城県、五浦海岸（岩石海岸）の 地形学的特徴と侵食実態

宇多高明*
山本幸次**

Geomorphological features and erosion of sea cliff on the Izura Rocky Coast in Ibaraki Prefecture

by Dr. Takaaki UDA
Koji YAMAMOTO

要 旨

海食崖の侵食状況調査手法を取りまとめ、茨城県の五浦海岸の海食崖の侵食調査に応用した。地質的に見ると、五浦海岸の地層は砂岩・泥質砂岩層、凝灰岩・泥岩互層、石灰岩層に大別され、これらの地層の分布状況に応じ、当海岸の海食洞は6パターンに分類された。砂岩・泥質砂岩層や凝灰岩・泥岩互層の場合は侵食が著しく、かなり厚い石灰岩層は海食洞の形成範囲を制約する効果を持つ。1980年～1985年の期間で海食崖の後退速度を求めると、最大値は1.4 m/yr、平均値は1.1 m/yrであった。五浦海岸の北部、南部、東部の海食崖は、波向出現率、地層分布、海食洞の分布および海食崖の後退速度等より特性分類が可能である。南部の海岸では、凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が海面付近に分布し、波浪の入射頻度も高いため海食崖の崩壊が生じ、海食崖の後退速度も大きい。一方、東部の海岸では波浪の入射頻度が高く、また海面付近に石灰岩層が多く分布しているため海食洞や波食窪などの海食地形が形成され易い。しかし、海食崖の後退速度は大きくない。また北部の海岸では、凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が海面付近に分布しているものの、北からの波浪の入射頻度が低いため海食崖自体の崩壊速度は比較的遅い。海食崖の後退を決定する要因としては、波浪条件のみならず岩質や地層の分布が重要であることが指摘される。

キーワード：岩石海岸、海食崖、海食洞、地層分布、海食崖の後退速度

Synopsis

Methodology for the investigation of sea cliff erosion is summarized, and it is applied to the study on the cliff erosion on the Izura Coast in Ibaraki Prefecture. In a geological sense the stratum on this coast is classified into three types composed of (1) sandstone and pelitic sandstone, (2) alternation of strata of tuff and mudstone, and (3) limestone. The shape of the sea cave on the Izura Coast is classified into six patterns depending on the distribution of these strata. In the cases in which the stratum is composed of sandstone and pelitic

* 河川部海岸研究室長 工博
** 河川部海岸研究室研究員

sandstone or the alternation of strata of tuff and mudstone cliff erosion is severe, whereas considerably thick stratum of limestone confines the formation zone of sea cave. In a period between 1980 and 1985 retreat rate of sea cliff was 1.4 m/yr at maximum and 1.1 m/yr on an average. The sea cliff erosion of the Izura Coast can be classified into three categories depending on the probability of occurrence of wave direction, distributions of stratum and sea cave, and retreat rate of sea cliff. On the southern part of the coast sea cliff can be easily eroded and its retreat rate is large, because the alternation of tuff and mudstone or sandstone and pelitic sandstone exists in the vicinity of the sea surface, and the probability of wave incidence from the south is large. On the eastern part of the coast sea cave and notch are liable to be formed because limestone exists near the sea surface. However, the retreat rate of sea cliff is not large. On the northern part of the coast retreat rate of sea cliff is not large because of the low probability of occurrence of wave incidence, although the same strata can be observed as is the case on the south part of the coast. Consequently it is concluded that not only the wave characteristics but also rock features and distribution of strata are important factors determining sea cliff erosion.

Key Words : Sea cliff, Rocky coast, Sea cave, Erosion, Stratum, Retreat rate of sea cliff.

目 次

1. まえがき	(5)
2. 岩石海岸の侵食状況の調査手法	(5)
3. 五浦海岸の自然条件	(6)
4. 海食崖の地形特性	(8)
4.1 海食崖表面における地層分布	(8)
4.2 海食崖の後退速度	(11)
4.3 海食洞の分布	(11)
4.4 海食洞の各パターンの比較	(13)
5. 結 論	(14)
謝 辞	(15)
参考文献	(15)

1. ま え が き

最近、地球の温暖化に伴う海水準の上昇による砂浜海岸の侵食が広く議論されているが、岩石海岸においても海水準が上昇すると侵食が助長されるはずである。岩石海岸の侵食は、一般に海食崖を形成しつつ進んでいくが、現海面より上部は飛沫帯であって風化が著しく、海食崖を構成する岩石の劣化が進んでいる。海水準が上昇すると、劣化した部分にも新たに波が作用するため、海食崖の後退が助長されることになる。一方、現海水準においても海食崖の後退が問題となっている海岸は全国に多数あり、しかもそこが景勝地となっているために景観を保護しつつ侵食対策を進めなければならない場合も多い。こうしたことから、岩石海岸の侵食に関する問題は砂浜海岸の侵食問題に劣らぬ重要性を有している。

ところで、岩石海岸で生ずる地形変化の時間スケールは、砂浜海岸のそれと比較するとはるかに長い。砂浜海岸では、構造物の影響が短期間にしかも顕著に現われることから多くの研究者の興味をひき、したがってその変形過程や機構に関する研究が数多くなされている。これに比較すると、岩石海岸の侵食に関する研究例は少ない。例えば、現地海岸の実態分析として、堀川・砂村²⁾は空中写真を用いて屏風ヶ浦の海食崖の後退状況を調べ、その後退速度を求めた。また、豊島⁶⁾は、花崗岩地域における海食洞などの侵食地形について研究した。さらに、岩石海岸の侵食機構自体に関しては、堀川・砂村²⁾、Sunamura⁸⁾が実験的に研究し、海食崖基部における岩屑の摩擦作用により海食崖の侵食が進むことを明らかにした。

以上に述べた研究例はあるものの、岩石海岸の変形過程や変形機構を定量的意味より明らかにするには、岩石海岸に関する定量的研究や現地データの蓄積が望まれている⁹⁾。このような点より、筆者らは岩石海岸の侵食実態や変形機構に関する研究を進めてきている^{10), 11)}。本研究では、まず岩石海岸の侵食状況の一般的な調査手法について述べ、茨城県北部に位置する五浦海岸を選んで現地調査を進め、その地形学的特徴と侵食実態を明らかにする。

2. 岩石海岸の侵食状況の調査手法

まず、既存の研究を参考にしつつ海食崖の侵食調査手法について述べる。海食崖の後退に関しては堀川・砂村²⁾が研究しており、その支配要因を図-1に示すよ

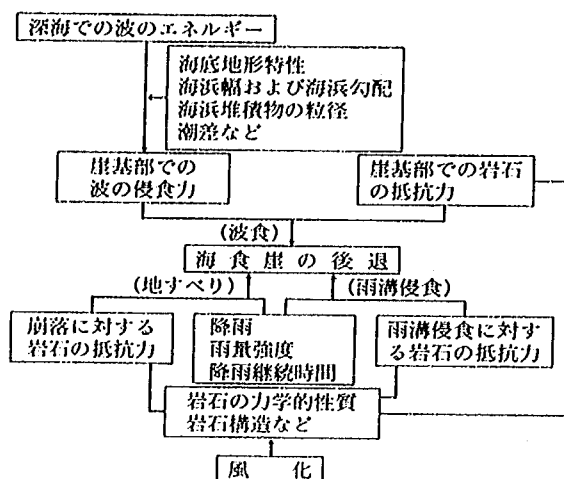


図-1 海食崖の後退を支配する要因
(堀川・砂村²⁾による)

うにまとめている。岩石海岸の侵食に関しては、砂浜海岸の場合より以上に気象・海象条件、地質、地形の多項目にわたる調査が必要とされる。その理由は、砂浜の変形が沿岸漂砂や岸沖漂砂によって生ずるのとは異なり、海食崖の後退は波の作用だけでなく地すべりや雨溝侵食によっても進み、それらには岩石の力学的特性や風化の程度などが関係するからである。

気象条件に関する主な項目には、雨量、気温、風向風速がある。雨量に関連しては、年平均雨量、年最大雨量、最大雨量強度、最大降雨継続時間、月別雨量分布、降雨回数などが必要とされる。これらは地すべりや雨溝侵食、断層・節理（岩石中の明瞭な割れ目であって、割れ目の面に平行な方向への相対的変位のないもの）に水が浸透し吸水膨張することによる岩石劣化などの基礎資料として役立つ。気温に関連しては年最高・最低気温、年最大気温較差、気温の日較差などの項目があり、これらは、岩石間の海水・雨水の凍結膨張による岩石の劣化、気温較差による岩石の劣化などの資料として有効である。風向風速に関しては卓越風向、平均風速、最大風速の資料を集めたい。これらは、波浪データがない場合の波浪推算や海食崖の風化面の把握などの資料として使えるからである。

海象条件としては波高、周期、波向、潮位が挙げられる。当該調査地点で観測データがない場合も多いが、そのようなときには近接する港湾などで得られた資料を準用すれば良い。これらのうち、特に潮位データは波食棚、海食洞、海水の飛沫帯などを調べる上で非常に重要である。

地質に関連しては、岩石の力学的・化学的性質、断

層・節理の分布などを調査する。採取した試料より、引張り強度、圧縮強度、水に対する性質を調べ、波力による岩石の劣化や岩石の吸水膨張による劣化の資料を得る。また、断層・節理などの岩盤の割れ目内では、波作用時に圧力の急激な上昇¹¹⁾が生じ、これによって岩盤自体の劣化が進むので、割れ目分布の調査が必要となる。

地形関連では、海底地形、海食崖の高さ分布やその後退速度、海食洞の分布と形状の調査がある。これらのうち、海食崖の後退速度は空中写真の比較によって求められる。この場合、一般に海食崖の平均的な後退速度は0.3~1.5 m/yrである⁹⁾ことから、空中写真の比較期間はできるだけ長くとる必要がある。海食洞の調査では形状や規模の調査とともに海食崖前面に砂や礫が存在するかどうか、存在する場合はその粒径についても調べるべきである。なぜならば、これらの砂や礫は波の作用下で運動し、海食崖前面に衝突することによって研磨効果を持つからである。また、写真を撮影して海食崖周辺の状況、海食洞の形状や内部の状況を調べることも有効である。

以下では、茨城県北部に位置する五浦海岸を対象として、上述の手法により地形学的特徴や侵食実態について調査した結果を示す。

3. 五浦海岸の自然条件

五浦海岸は茨城県北部に位置し、SSW~NNE方向に延びる海岸線より太平洋に突出した岬の先端部にある(図-2)。この海岸は、岩石海岸特有の自然景観(写真-1)と岡倉天心ゆかりの六角堂(写真-2)を有する名勝地となっているが、海食崖侵食が徐々に進み、最近では六角堂の保全上問題が生じている。本研究の調査区域は、大津港から長浜までの範囲である(図-2)。大津港から大津岬までの区域では、海岸線の屈曲は少ないが、大津岬から長浜までは小さい岬と入江で構成される。また、茨城県から福島県にかけての太平洋岸は、第三紀中新世に形成された堆積岩類が広域に分布しており、五浦海岸の地表地質は多賀層、成田層および関東ローム層である。

五浦海岸の先端に位置する大津観測所で観測された1976年~1985年の気温資料のうち、各年の最高・最低気温および気温差を表-1に示す。各年の最低気温は平均約-7℃である。このことは、冬期において岩石の割れ目に入った海水は十分凍結しうることを示している。岩石の割れ目内の海水が凍結すると体積が膨張し、

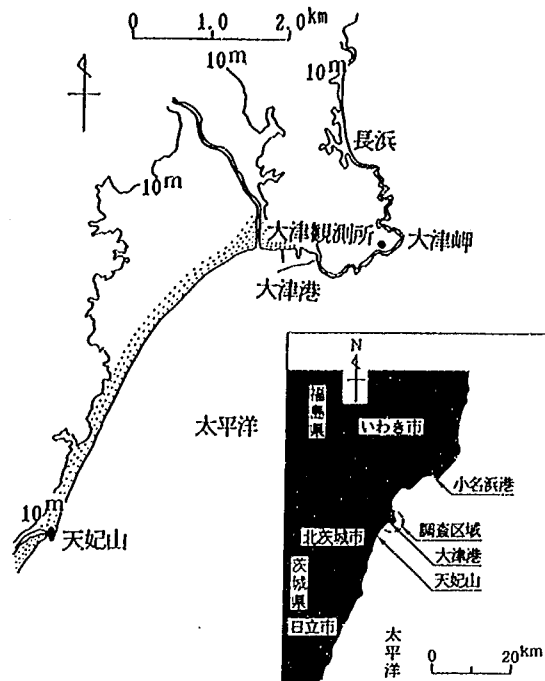


図-2 五浦海岸の位置



写真-1 岩石海岸特有の地形(海食洞)



写真-2 六角堂の遠景

表-1 年最高気温・最低気温

年	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
最高気温(°C)	29.0	32.0	30.9	31.8	27.6	30.7	28.3	33.4	34.0	32.1
最低気温(°C)	-7.0	-8.0	-7.4	-5.9	-6.8	-6.2	-6.7	-6.6	-8.2	-7.6
気温差(°C)	36.0	40.0	38.3	37.7	34.4	36.9	35.0	40.0	42.2	39.7

表-2 気温日較差の各年における最大値

年	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
発生日	11/4	3/3	4/26	1/4	1/27	11/11	1/21	12/13	1/15	11/4
最高気温(°C)	22.0	19.5	19.7	13.4	12.4	16.2	11.0	12.7	12.6	17.9
最低気温(°C)	6.0	2.0	4.1	-1.1	-3.6	2.2	-3.4	-1.4	-2.0	3.5
日較差(°C)	16.0	17.5	15.6	14.5	16.0	14.0	14.4	14.1	14.6	14.4

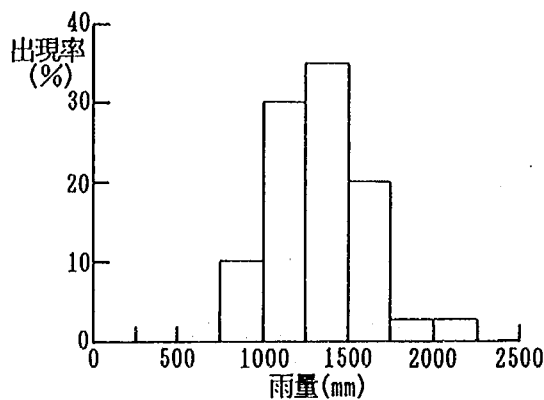


図-3 五浦海岸の降水量分布

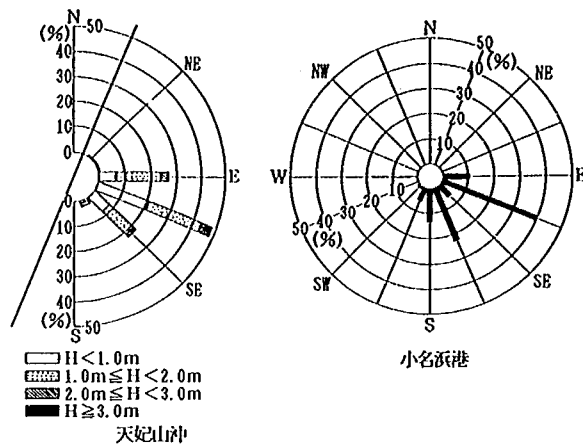


図-4 天妃山沖および小名浜港における波向出現率

割れ目を押し広げることになり岩石が劣化する。岩石が劣化すれば海食崖は崩壊し易くなる。一方、各年における気温の日較差の最大値は約 15°C である (表-2)。日較差は、砂漠地帯等に比べると小さいことから、当海岸では温度変化に伴う収縮膨張が原因で生じる岩石の劣化は小さいと考えられる。

1926年～1979年の期間における大津観測所での雨量の出現頻度を図-3に示す。1年間の降水量としては1250～1500 mmの出現率が最も高い。この降水量は、岩質によっては雨溝侵食を引き起こすに足る量であると考えられる。

大津港からSSW方向に約5 km離れた天妃山沖において1984年4～11月に観測された波向別波高出現頻度と、小名浜港沖で1975年～1984年に観測された波向頻度¹²⁾を図-4に示す。天妃山沖では出現率の最も高い波向はESE方向であって、E, SE方向がこれに次いでいる。小名浜港においても出現率の最も高い波向はESE方向である。波向の観測時期は両地点で異なる

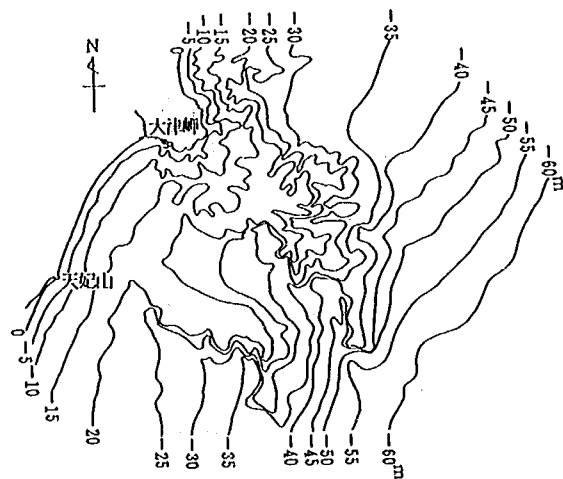


図-5 五浦海岸周辺の海底地形

ものの、卓越波向の方向は良く一致する。また潮位に関しては、大津港における潮位観測によると大潮時の平均潮差は0.8 m～1.0 mであり、朔望平均満・干潮位はそれぞれ T. P. +0.39 m, -1.15 m にある。ここに T. P. は東京湾中等潮位 (Tokyo Peil の略) である。

五浦海岸周辺の海底地形を図-5 に示す。水深の基準は T. P. 0 m とした。-60 m 以深の等深線はほぼ直線状であり、SSW～NNE 方向に延びている。この方向は全体的な海岸線方向 (図-2 参照) と一致する。大津岬沖の -20 m～-55 m の等深線は非常に複雑な形状を有しているが、E～SE 方向の -5 m～-20 m の範囲には緩斜面が存在し、その緩斜面の発達方向は卓越波浪の入射方向 (E～SE) とほぼ一致している。

4. 海食崖の地形特性

4.1 海食崖表面における地層分布

五浦海岸の地形特性を図-6 に示す A～D の区間で調査した。なお、図中の海岸形状を表わす 2 本の線は海食崖の上部と基部を表わす。A 区間は大津港から大津岬までの比較的なだらかな海岸線の区域である。B 区間は大津岬先端からチャンボン洞までの湾入部であ

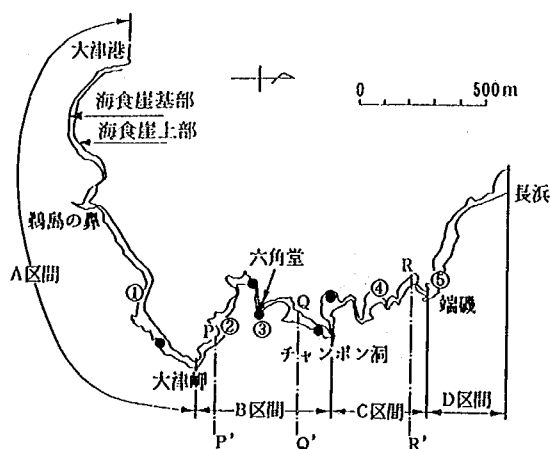


図-6 五浦海岸での調査区間

り、ここには六角堂が位置する。C 区間はチャンボン洞から端磯までの湾入部、D 区間は端磯から長浜までの区間である。まず、図中の●印 (5 点) において岩石を採取し、分析した。また、各区間において海食崖の高さと地層の分布を海上より調べた。海食崖の高さは巻尺等を用いて実測し、地層分布はあらかじめ用意した海食崖の断面形にスケッチして求めた。目測であるから地層の位置の測定精度は数十 cm のオーダーである。また、①～⑤の地点で海食崖の状況を写真撮影した。

海食崖の断面形は 20 測線で調べた。これらのうち代表的な 3 測線 (P-P', Q-Q', R-R'; 位置は図-6 参照) の断面形を図-7 に示す。海食崖はほぼ垂直に切り立っており、海面下には波食棚が形成されている。また海食崖の基部 (海面付近) には波食崖が形成されていることが分かる。

図-6 の●印の 5 点で採取した岩石の分析結果を表-3 に示す。地層は砂岩・泥質砂岩層、凝灰岩と泥岩の細かい互層 (以下、凝灰岩・泥岩互層)、石灰岩層の 3 つに大別できる。砂岩・泥質砂岩層の岩質は、乾燥比重が 1.1～1.2、吸水率が 37～42 % の軟岩である。乾湿繰り返し試験 (試料水浸 24 時間、90℃ 炉乾燥 48 時間) によると、採取した試料は 4 回以内で砂泥状に崩壊した。また、この層の特性として節理が少ないことが挙

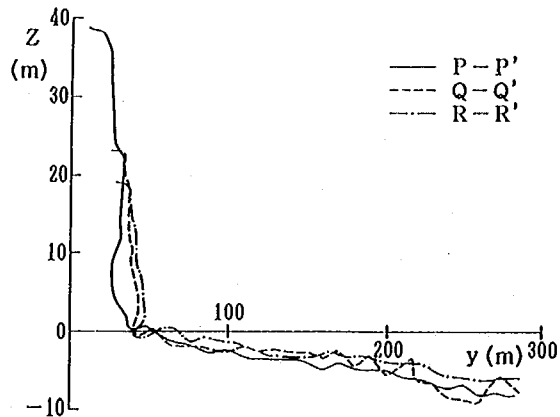


図-7 3 測線 (P-P', Q-Q', R-R') に沿う断面形

表-3 各地層の物理的特性

地 層 名	硬 さ	乾燥比重	吸水率 (%)	乾湿繰り返し試験結果
砂岩・泥質砂岩層	軟岩	1.1～1.2	37～42	4 回以内で崩壊
凝灰岩・泥岩互層	軟岩	0.9～1.0	61	4 回以内で崩壊
石灰岩層	中硬岩	2.0～2.6	1.4～7.4	6 回で崩壊せず

げられる。凝灰岩・泥岩互層の岩質は、乾燥比重が0.9～1.0、吸水率が61%の軟岩である。乾湿繰返し試験では凝灰岩と泥岩の吸水膨張率が異なるため、層理面に沿って崩壊した。また、この層には層理面に直交した節理が発達している。石灰岩層の岩質は、乾燥比重が2.0～2.6、吸水率が10%以下の中硬岩である。乾湿繰返し試験では、6回繰返しても崩壊しなかった。

次にA～D区間の地層分布について述べる。最初に、A区間の海食崖の高さと地層の分布を図-8に示す。地層分布は、常に海食崖を海側よりみて整理しており、距離 x は図の下部に示すように基点からの直線距離である。また、図の下部には平面形状を示しており、地形を表わす2本の線は図-6と同様に海食崖の上部と基部を表わす。図-9～11の場合も同様に整理し

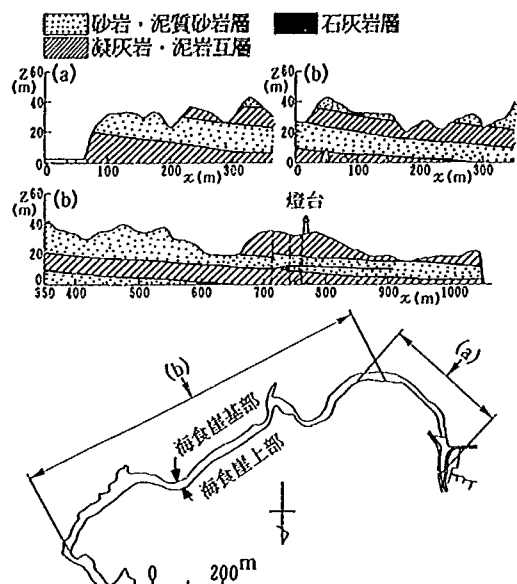


図-8 海食崖高と地層の沿岸方向分布 (A区間)



写真-3 凝灰岩・泥岩互層の崩壊状況

た。図-8に示した(b)の範囲では、海食崖の高さは岬の先端に向かうと低くなり、またいずれの地層面も岬先端に向かって低くなる走向を示す。砂岩・泥質砂岩層と凝灰岩・泥岩互層は層厚が10～20mと比較的厚いが、石灰岩層は1m未満と薄い。海面付近には凝灰岩・泥岩互層と砂岩・泥質砂岩層が分布している。燈台付近に断層があり、石灰岩層は不連続になっている。A区間の測点①(図-6参照)の状況を写真-3に示す。海食崖の基部には凝灰岩・泥岩互層の崩壊により形成された角張った岩石が見られる。海食崖の表面は平坦であり、節理に沿って凝灰岩・泥岩互層の崩壊が生じたことを示している。

図-9にはB区間の海食崖の高さと地層の分布を示す。海食崖の高さは六角堂付近の湾入部で約10mと低く、チャンボン洞に向かうと高くなる。(a)～(f)の区間の地層はA区間と同様な特性を示すが、六角堂付近から北側(h)～(i)では石灰岩層が厚くなる。海面付近の層は石灰岩層となり、海食洞が多くなる。写真-4にはB区間の南側に位置する測点②(図-6参照)の海食崖の状況を示す。V字型の部分、砂岩・泥質砂岩層が降雨による侵食を受け、地滑りの崩壊した跡と考えられる。写真-5は六角堂付近の測点③の状況である。石灰岩層は、波食を受けにくいため海側にせり

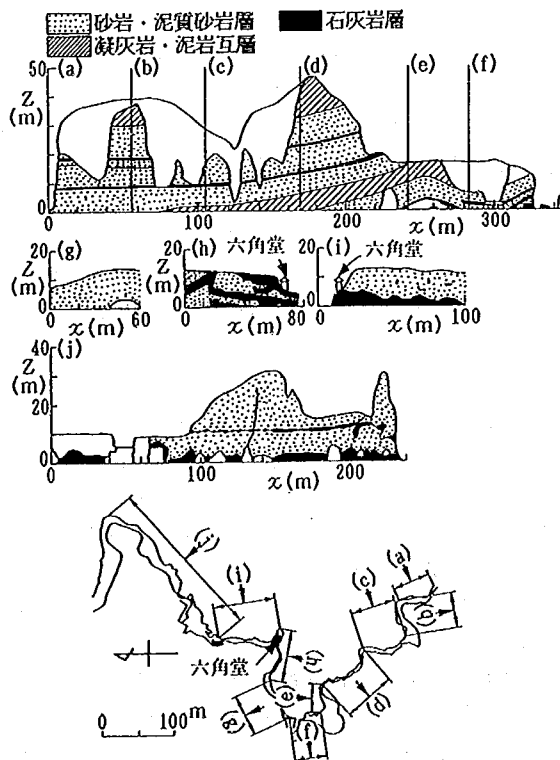


図-9 海食崖高と地層の沿岸方向分布 (B区間)



写真-4 砂岩・泥質砂岩層の地すべりの崩壊状況

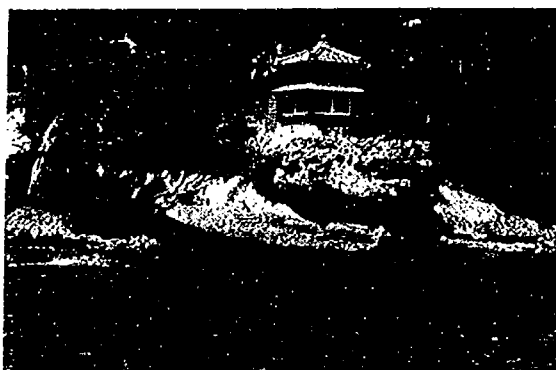


写真-5 六角堂とその周辺の海食地形

出している。一方、砂岩・泥質砂岩層の部分は波食により削られ、波食窪が形成されている。六角堂は石灰岩層の上に建てられているが、石灰岩層の下の砂岩・泥質砂岩層が侵食されているため不安定な状態となっている。

C区間の海食崖の高さと地質の分布を図-10に示す。B区間と同様に湾入部では海食崖の高さが低く、岬の先端で高い傾向を示す。地層はA区間のような平行地層ではなく、砂岩・泥質砂岩層中に石灰岩層が局所的に集中している。また、断層で区切られた凝灰岩・泥岩互層のみの区間がある。C区間の測点④にある海食洞を写真-6に示す。海面付近の地層は、乾湿繰り返し試験によると砂泥状に崩壊する砂岩・泥質砂岩層であるために、海食洞の表面は滑らかになっている。砂泥状に崩壊した砂岩・泥質砂岩は波により運ばれ易いため、海食崖の基部や海食洞には礫や岩石の破砕片は見られない。

図-11は、D区間の海食崖の高さと地層の分布である。海食崖の高さは端磯から長浜に向かうと低くなる。砂岩・泥質砂岩層にある石灰岩層が断層によって不連続になっている。海面付近の地層は、南側では砂岩・

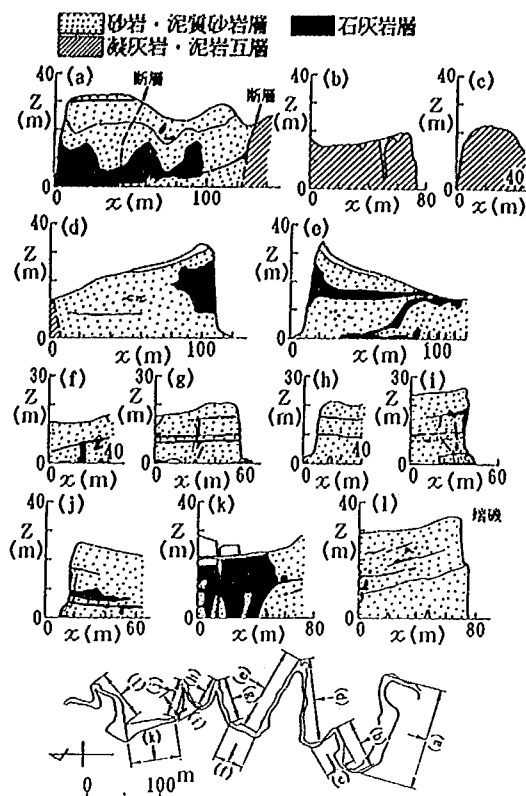


図-10 海食崖高と地層の沿岸方向分布 (C区間)



写真-6 砂岩・泥質砂岩層に形成された海食洞

泥質砂岩層、北側では凝灰石・泥岩互層である。写真-7にはD区間にある測点⑤の海食崖の状況を示す。海食崖に割れ目が見られる。このような割れ目に波が作用すると、wedge action¹³⁾により海食崖は後退すると考えられる。

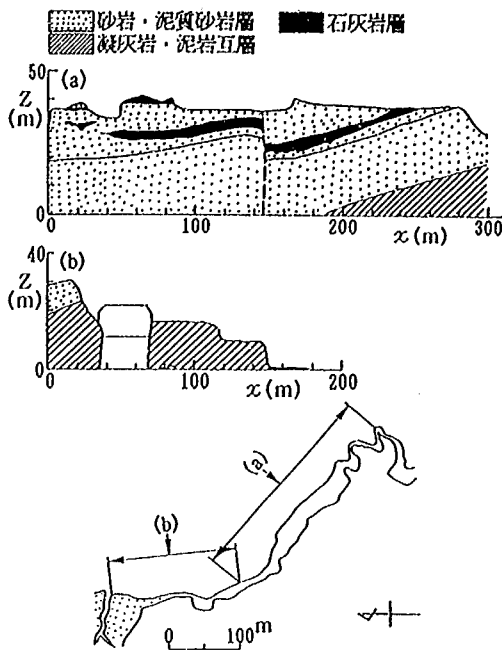


図-11 海食崖高と地層の沿岸方向分布 (D 区間)



写真-7 端磯先端部の岩石の割れ目状況

4.2 海食崖の後退速度

1980年4月と1985年1月に撮影された縮尺約1/4000の空中写真を1/100に拡大して海岸線形状を読み取り、両者を比較して海食崖の後退状況を調べた(図-12)。海食崖の後退が見られた地点は南部に集中しており(C1~C5)、東部には1地点のみで北部には見られなかった。海食崖の最大後退量(海岸線に直角方向に測った後退量)は、各々1.5m(C1)、2.0m(C2)、7.0m(C3)、6.5m(C4)、6.0m(C5)、3.0m(C6:むじな窪)である。C1~C6の侵食面積をプランメー

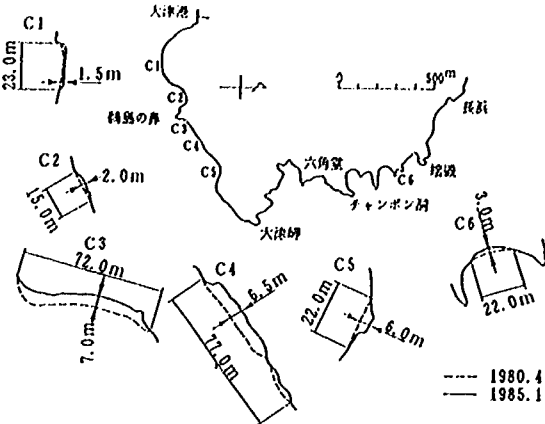


図-12 海食崖の後退量の場所的分布

タを用いて測定し、侵食範囲の沿岸方向距離で除して海食崖の後退速度を求めると、その最大値はC3の1.4m/yrであり、平均値は1.1m/yrとなった。この値は五浦海岸と同様の砂岩、泥岩からなる海食崖の平均後退量である0.3~1.1m/yr⁹⁾と比較すると若干大きい値となっている。

1980年~1985年の期間では、図-12に示したように主に五浦海岸の南部で海食崖の後退が進んだ。このことは、図-4に示す波向別波高出現率と図-8~11に示した地層分布と良い対応を示す。吸水膨脹・乾燥収縮の繰り返しにより劣化しやすい岩質の凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が海面付近に分布し、波浪の入射頻度も高い南部では海食崖の後退が進みやすい。一方、波浪の入射頻度は高いが、石灰岩層が海面付近に多く分布している東部では、海食崖の後退は局所に限られる。また、南部と同様に海面付近に凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が分布している北部では、北からの波浪の入射頻度が低いため後退速度は小さい。

4.3 海食洞の分布

岩石海岸の侵食形態には、海食崖の後退とは別に海食洞の形成がある。しかし、海食洞の分布状況は空中写真では把握できないため、空中写真により海食崖の後退状況を調べるのみでは岩石海岸の侵食実態を明らかにしたことはならない。そこで、現地調査により海食洞の分布状況を調べた(図-13)。形成の進んだ海食洞は東部に多く見られる。図-12によると、海岸東部では海食崖の後退は局所的であったが、海食洞が多く分布することから南部と同様に侵食が進んでいるといえる。次に、海食洞(図-13、①~⑮)の形状と地層の関係についての調査を干潮時に行った。海食洞の形状はスタッフと巻尺を用いて、地層は風化部を除去し目

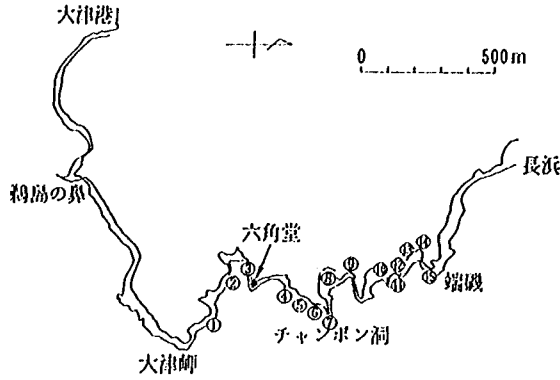


図-13 海食洞の調査位置

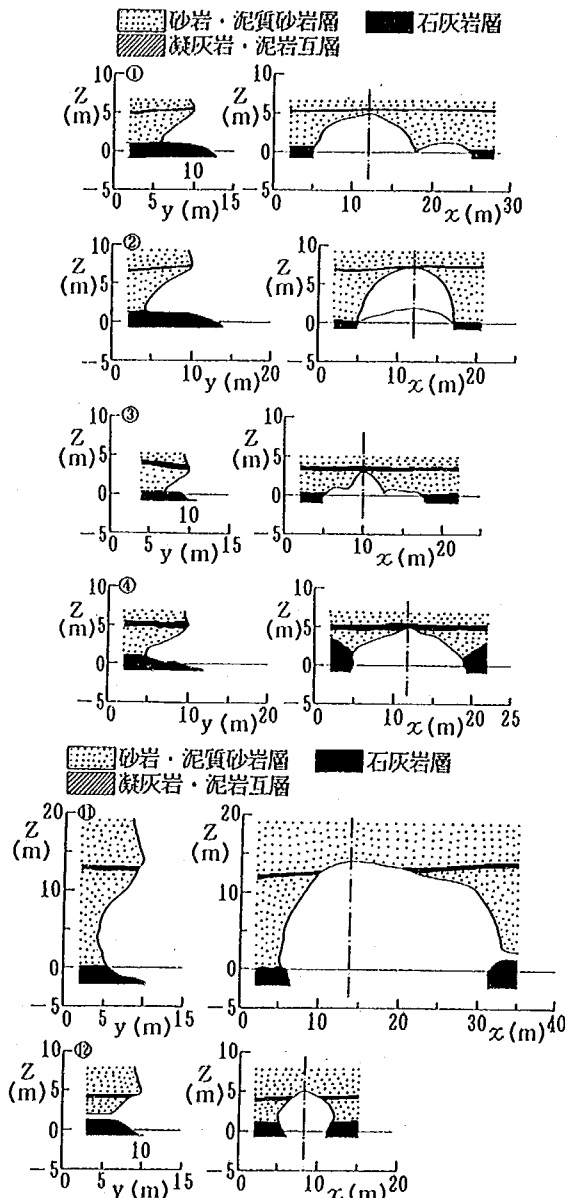


図-14 海食洞と地層の分布 (パターン I)

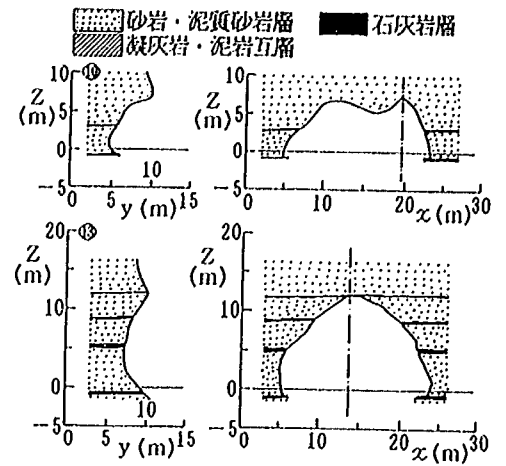


図-15 海食洞と地層の分布 (パターン II)

視により調べた。その結果、海食洞は形状と地層の関係より以下に述べる6パターンに分類された。

パターン I には①～④および⑪, ⑫の海食洞が属し、石灰岩層間の砂岩・泥質砂岩層が侵食されて形成されている (図-14)。海食洞の高さは上部の石灰岩層で制約されており、最も凹んでいる位置は海面近くの石灰岩層と砂岩・泥質砂岩層の境目である。海食洞の規模としては、ほとんどの場合奥行が約 5 m、高さが約 5 m であるが、⑪の海食洞の高さは約 12 m と他と比較して高い。

パターン II には⑩, ⑬が属する (図-15)。砂岩・泥質砂岩層中に石灰岩の薄層が数層見られる。しかし、これらの石灰岩層は薄いためにパターン I のように海食洞の上部を制約する役目は果たしていない。⑬の海食洞に特徴的なように、奥行が約 3 m とパターン I に比較して短く、逆に高さが約 12 m と高い。

パターン III には⑤, ⑥および⑮の海食洞が属し、海面近くが石灰岩層、その上部が砂岩・泥質砂岩層の場所に形成される (図-16)。パターン I と違い、その高さを制約する上部の石灰岩層はない。この場合、海食洞の高さは、海食崖に作用する波の打ち上げ高に比例して決まると考えられる。また、海食洞の幅が広いほど奥行は短い (図-16, ⑤→⑮→⑥)。

パターン IV には⑧, ⑨の海食洞が属し、凝灰岩・泥岩互層に砂岩・泥質砂岩層の薄層がある場所に見られる (図-17)。⑧の海食洞の高さは約 12 m であって、パターン I (①～④) の海食洞の高さ (約 5 m) と比較すると高いが、奥行は約 3 m であってタイプ I と比較

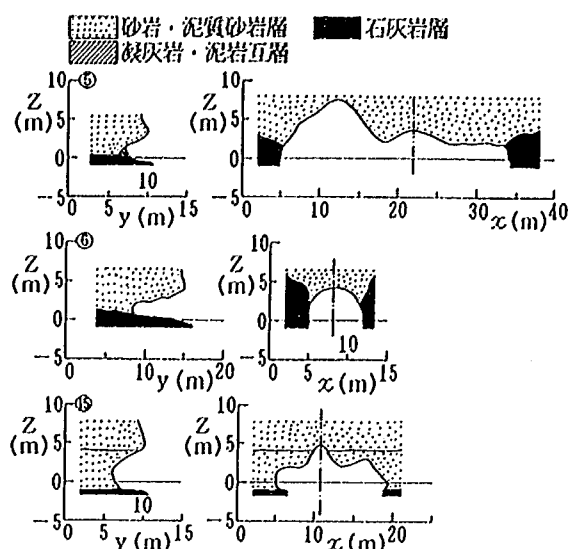


図-16 海食洞と地層の分布（パターンIII）

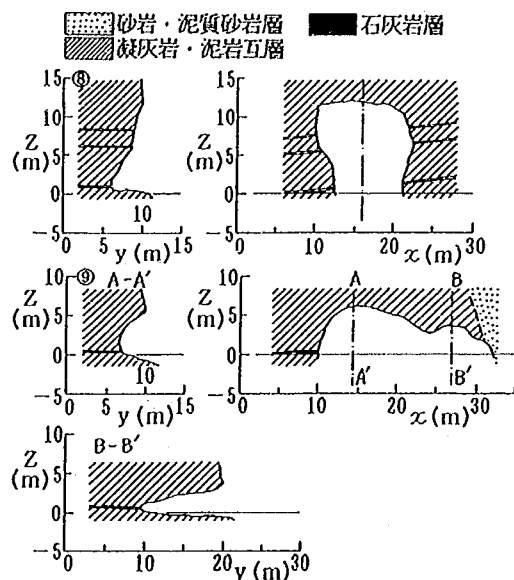


図-17 海食洞と地層の分布（パターンIV）

すると短い。海食洞の高さが高いのは、海食洞の正面形状が矩形であることから、凝灰岩・泥岩互層がブロック状に崩壊するためと考えられる。なお、⑨の海食洞の幅は広いので断面形は2つ示している。断層から離れた位置の断面形（A-A'）は⑧の海食洞と同様奥行が短い、断層に近い位置の断面形（B-B'）は奥行が長い。このことは、断層などの弱線に沿って海食洞が発達しやすいという従来の報告⁵¹を裏付ける。

パターンVには⑦の海食洞が属する。パターンIの

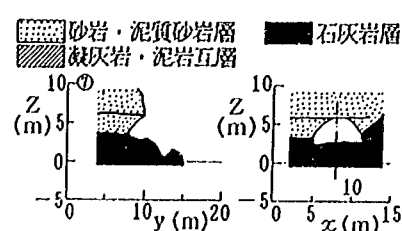


図-18 海食洞と地層の分布（パターンV）

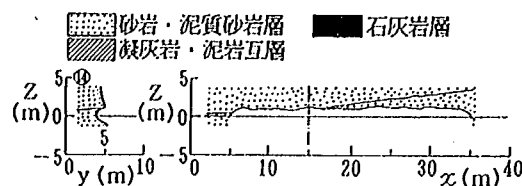


図-19 海食洞と地層の分布（パターンVI）

海食洞と同様、石灰岩層間の砂岩・泥質砂岩層が侵食されて形成されている（図-18）。しかし、下部の石灰岩層と砂岩・泥質砂岩層との境目が海面より高い位置にあるため、海食洞の位置が全体的に高い位置にあり、奥行も短い。この海食洞は、主に潮位が高い条件において形成されたと考えられる。

最後のパターンVIには⑩が属する（図-19）。これは波食窪と呼ばれ、奥行に比べ幅が広い侵食地形である。砂岩・泥質砂岩層のみの場所に形成されている。パターンI～Vと比較すると、幅は広いが奥行は短く、高さも低い。

4.4 海食洞の各パターンの比較

海食洞の6パターンを侵食の進む層の種類、海食洞の上部制約層の有無、上部制約層の種類、海食洞の基盤、その他の面より分類すると表-4となる。侵食の進む層は、いずれも砂岩・泥質砂岩層や凝灰岩・泥岩互層などである。表-3に示したように、これらは軟岩であって吸水膨脹・乾燥収縮の繰り返しにより劣化し、波浪によって侵食され易いと考えられるから、地層の分布と海食洞の形成には良好な対応関係が見られる。石灰岩のかなり厚い層があると海食洞の上部が制約されるが、層が薄い場合は海食洞の上部は制約されない。大部分の海食洞の最深部は、海面近くにある。これは平面海面付近で重複波圧が最大となることによる。また、海食洞の形状（奥行、高さ、幅）と地層との間には次の関係がある。海食洞は沿岸方向と上部を制約さ

表-4 海食洞のパターン分類

パターン	侵食の進む層	海食洞の 上部制約層の有無	上部制約層	基盤	備 考
I	砂岩・泥質砂岩層	あり	石灰岩	石灰岩	海面近くの石灰岩層と砂岩・泥質砂岩層の境目付近が最も侵食。
II	砂岩・泥質砂岩層 (一部、石灰岩の薄層あり)	なし	—	—	
III	砂岩・泥質砂岩層	なし	—	石灰岩	海面近くの石灰岩層と砂岩・泥質砂岩層の境目付近が最も侵食。
IV	凝灰岩・泥岩互層 (一部、砂岩・泥質砂岩の薄層あり)	なし	—	—	海食洞の高さが高い。海面近くの岩質変化部で最も侵食。
V	砂岩・泥質砂岩層	あり	石灰岩	石灰岩	パターンIと類似する。海食洞の標高がパターンIよりも高い。
VI	砂岩・泥質砂岩層	なし	—	—	波食崖と呼ばれ、奥行きに比べ幅が長い。

れると、波の進行方向に侵食が進み、奥行が長くなる。また、沿岸方向のみを制約されると、鉛直方向に侵食が進み、高さは高くなる。さらに、砂岩・泥質砂岩層のみの場所では、海食洞の幅が広く、奥行は短い。このことは、砂岩・泥質砂岩層が吸水膨脹・乾燥収縮の繰り返しで劣化し易い岩質のため、基部の侵食が進むと上部が崩れ落ちること、および沿岸方向の発達を制約する層がないことによる。また、凝灰岩・泥岩互層が大部分を占める場所では、上部の岩石がもろいため海食崖の基部が侵食されると崩落して、奥行が短く高さの高い海食洞が形成される。岩石の割れ目内では側壁よりも天井に作用する衝撃圧が大きい¹¹⁾ため、上部の石灰岩層が薄い場合には高さの制約条件とはならない。このように海食洞周辺の地層によって海食洞の発達方向が制約され、作用する波のエネルギーが同じでも形状や規模は異なると考えられる。

海食洞が形成される場所での海食崖の後退は、間欠的に生ずる。したがって比較的長期間での空中写真の比較でも侵食が生じていないとの結果が得られることもある。しかし、この間にも海食洞の発達は進み、その規模は大きくなることから、高波浪時や地震などの異常時に海食崖の大規模な崩壊が生じる可能性は大きい。したがって、空中写真による海食崖の侵食調査と同様に、海食洞の形状や規模および分布などの調査が重要である。

5. 結 論

本研究の主要な結論を以下に示す。

- ① 堀川・砂村²⁾の研究をもとに、海食崖の侵食状況の

調査手法を取りまとめた。また、この手法を茨城県の五浦海岸の海食崖の侵食調査に応用した。

- ② 五浦海岸における各年の最低気温は平均約 -7°C である。これは、冬期において岩石の割れ目に入った海水が凍結膨脹し、岩石を劣化させうる条件を満足している。また、1年間の降水量としては1250~1500 mmの出現率が最も多い。この降水量は、岩質によっては雨溝侵食を引き起こすに足る量であると考えられる。

- ③ 当海岸への来襲波の出現率の最も高い波向はESE方向であり、E、SE方向がこれに次ぐ。

- ④ 当海岸の地層は砂岩・泥質砂岩層、凝灰岩・泥岩互層、石灰岩層の3つに大別された。岩石試験によると、砂岩・泥質砂岩層は、吸水膨脹・乾燥収縮の繰り返しにより劣化し易く砂泥状に崩壊する岩質であった。凝灰岩・泥岩互層は、凝灰岩と泥岩の吸水膨脹率が異なるため層理面に沿って崩壊する岩質であった。一方、石灰岩層は吸水率が小さく、水に対して安定した岩質であった。

- ⑤ 1980~1985年の期間で海食崖の後退速度を求めると、最大値は1.4 m/yr、平均値は1.1 m/yrであった。この値は五浦海岸と同様の砂岩、泥岩から成る海食崖の平均後退量である0.3~1.1 m/yr⁹⁾と比較すると若干大きい値であった。

- ⑥ 波向出現率、地層分布、海食洞の分布および海食崖の後退速度等の面より、五浦海岸の北部、南部、東部の海食崖はそれぞれ異なった特徴を示した。海岸南部では、凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が海面付近に分布し、波浪の入射頻度も高いため海食崖の崩壊が生じ、海食崖の後退速度も大きい。一

方、海岸東部では波浪の入射頻度は高いが、石灰岩層が海面付近に多く分布しているため海食洞や波食窪の海食地形が形成され易い。また海岸北部では、南部と同様に凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が海面付近に分布しているが、北からの波浪の入射頻度が低いいため海食崖自体の崩壊や海食地形は生じにくい。このように、海食崖の侵食に関しては、波浪条件のみならず、岩質や地層の分布が重要な要因となる。

⑦ 五浦海岸の海食洞は地層の分布状況に応じ6パターンに分類され、分類結果は表-4のように整理される。侵食が著しく進む層は砂岩・泥質砂岩層や凝灰岩・泥岩互層の場合であり、かなり厚い石灰岩層がある場合には海食洞の形成範囲を限定させる役目を果たす。

謝 辞

本研究を進めるに際しては、瀬谷義彦茨城大学名誉教授を委員長とし、鈴木昌友茨城大学教授、斉藤登志雄茨城大学教授、後藤末吉茨城大学五浦美術研究所長、砂村継夫筑波大学教授ほか、茨城県の代表者からなる「五浦海岸侵食対策検討委員会」の調査資料の一部を使わせていただいた。ここに記して関係諸氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小池一之：海面上昇と最近の人工海浜，地理，35-6，pp. 21～28，1990。
- 2) 堀川清司・砂村継夫：航空写真による海蝕崖の後退に関する研究，第14回海岸工学講演会講演集，pp. 315～324，1967。
- 3) 堀川清司・砂村継夫：千葉県屏風ヶ浦の海岸侵蝕について—航空写真による海蝕崖の後退に関する研究・第2報—，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 137～146，1969。
- 4) 堀川清司・砂村継夫：千葉県屏風ヶ浦の海岸侵蝕について(2)—航空写真による海蝕崖の後退に関する研究・第3報—，第17回海岸工学講演会講演集，pp. 289～296，1970。
- 5) 堀川清司・砂村継夫：千葉県屏風ヶ浦の海岸侵蝕について(3)—航空写真による海蝕崖の後退に関する研究・第4報—，第19回海岸工学講演会講演集，pp. 13～18，1972。
- 6) 豊島吉則：花崗岩地域の海食地形—山陰，浦富海岸の事例，鳥取大教育研究報，16，pp. 1～14，1965。
- 7) 堀川清司・砂村継夫：海食崖の侵食に関する実験的研究，第15回海岸工学講演会講演集，pp. 149～157，1968。
- 8) Sunamura, T.: A wave tank experiment on the erosional mechanism at a cliff base, Earth Surface Processes and Landforms, 7, pp. 333～343, 1982。
- 9) 砂村継夫：波による岩石海岸の地形変化—最近の研究とその問題点—，地理評，Vol. 48, No. 6, pp. 395～411，1975。
- 10) 宇多高明・山本幸次・砂村継夫・前原隆生：茨城県、五浦海岸（岩石海岸）の地形学的特徴について，海岸工学論文集，第37巻，pp. 364～368，1990。
- 11) 山本幸次・砂村継夫・宇多高明：重複波作用時における岩盤の割れ目内の圧力上昇に関する実験的研究，海岸工学論文集，第37巻，pp. 314～318，1990。
- 12) 運輸省小名浜港工事事務所：小名浜港気象海象記録整理報告書，1985。
- 13) Sunamura, T.: Processes of sea cliff and platform erosion, in P. D. Komar (ed.), CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 233～265, 1986。

平成2年8月2日 原稿受理

越流式ゲートの越流水膜振動特性

角 哲也*
大久保精二**
中 島 康 夫***

Characteristics of Nappe Oscillations on Overflow Gates

by Tetsuya SUMI
Seiji OKUBO
and
Yasuo NAKAJIMA

要 旨

河川の堰やダムの越流式ゲートおよび砂防ダム等において、越流水膜が振動を生じ、これに伴い低周波空気振動が発生することがある。この越流水膜振動は、これら河川構造物の安定性上問題を生じるのみならず、周辺環境に与える影響が大きく、適切な防止対策が不可欠である。

本研究では、水膜を励起する振動発生機構を明らかにするとともに、振動防止対策および低周波空気振動による低周波音レベルの推定式について考察する。検討は、振動発生に複雑に関係する要素を分離するために、鉛直落水膜モデル、フラップゲート越流水膜モデルおよび越流幅を可変とした三次元越流水膜モデルを用いて水理模型実験により実施している。得られた主要な結論は次のとおりである。

- 1) 水膜振動はゲート形状の影響をほとんど受けず、落下後の水膜固有の現象と考えられる。
- 2) 水膜はゲート振動を伴わなくても固有の周期で振動するが、ゲート扉体等の固有周波数が水膜振動の発生周波数の0.75~2.0倍の範囲にある場合には、水膜振動周波数がシフトする可能性がある。
- 3) 水膜振動の発生周波数は、落下高および水膜流速に関係していると考えられる。
- 4) 越流幅、越流水深、水膜背後の空洞容積(給気の有無を含む)、落下点の水深などは、水膜振動の発生領域および振動レベルに影響を与えると考えられる。
- 5) 水膜振動の発生領域は長径間ほど広く、振動ピークを与える越流水深が増加する傾向がある。
- 6) 振動防止対策として水膜を分断する「スポイラ」を設置する場合には、ゲート使用範囲を考慮して、可能な限り2 m程度以下の水切り効果を確保することが望ましい。
- 7) 水膜振動による低周波音圧レベルは水膜両端の境界条件に影響され、水膜の両端を堰柱から離すことは、水膜背後の空洞を開放するのみならず音響的にも低域効果があると考え

* ダム部ダム水工研究室 研究員(現 近畿地方建設局大滝ダム工事事務所調査設計第一課長)
 ** ダム部ダム水工研究室 部外研究員(現 三菱重工業㈱)
 *** ダム部ダム水工研究室 部外研究員(現 鶴岡本鉄工所)

られる。

- 8) 水膜振動による低周波空気振動は水膜落下点における線音源と考えられ、また、水流のエネルギーに水膜振動による補正を行うことにより低周波音圧レベルの推定を行うことが可能である。

キーワード：越流式ゲート，フラップゲート，低周波空気振動，水膜振動，スポイラ，砂防ダム

Synopsis

On overflow gates installed on river weirs or dams and sometimes on Sabo dams, intensive nappe oscillations which cause gate vibrations and low frequency air vibrations are occurring in a specific overflow depth. Since this nappe oscillation may make structures instable and also has serious environmental effect by low frequency air vibrations, it is indispensable to devise effective countermeasures to restrain the oscillation.

This study focuses on an oscillation mechanism which excites the nappe and investigates countermeasures as well as measures to estimate Sound Pressure Levels by low frequency air vibrations. In order to separate factors complicatedly concerned with the oscillation, we conducted the three different hydraulic models, i. e. vertically falling nappe model, flap-gate overflow nappe model and three-dimensional overflow nappe model changeable in weir width. Main conclusions are followings;

- 1) The nappe oscillates naturally, since configuration of a gate-leaf surface has rarely influence on the oscillation.
- 2) Nappe may cause the oscillation under its natural frequency without a gate vibration and the frequency can be shifted in case that a gate leaf has a natural frequency within 0.75~2.0 times the nappe natural frequency.
- 3) Nappe oscillation frequency are closely concerned with fall heights and water fall velocities.
- 4) Weir width, overflow depth, volume of an air cavity behind the nappe (including existence of an air vent), downstream depth at a falling point influence the oscillation range and peak levels.
- 5) On long-span gates, oscillation range is getting wider and an overflow depth which generates the maximum oscillation level also increase.
- 6) 'Spoilers' are desirable to be installed within about 2 m spaces to make sure its nappe splitting effect.
- 7) Since sound pressure levels are influenced by the boundary conditions of both ends of nappe, detaching the nappe from side piers is effective both for releasing air pressure in a cavity and diminishing sound pressure levels.
- 8) Low frequency air vibration generated by the nappe oscillation forms a line sound source at a falling point and its sound pressure levels can be estimated by water potential energy corrected by nappe oscillation coefficient.

Key Words: Overflow gate, Flap-gate, Low frequency air vibration, Nappe oscillation, Spoiler, Sabo dam

目 次

1. ま え が き	(5)
2. 水膜振動発生事例	(5)
3. 水膜振動機構	(7)
4. 本研究の目的および内容	(8)
4.1 鉛直落下水膜モデル	(8)
4.2 フラップゲート越流水膜モデル	(8)
4.3 三次元越流水膜モデル	(8)
5. 実験方法	(8)
5.1 実験装置	(8)
5.1.1 鉛直落下水膜モデル	(8)
5.1.2 フラップゲート越流水膜モデル	(9)
5.1.3 三次元越流水膜モデル	(9)
5.2 実験条件	(11)
5.3 実験方法および計測方法	(12)
6. 実験結果	(13)
6.1 鉛直落下水膜の振動特性	(13)
6.2 フラップゲート越流水膜の振動特性	(19)
6.2.1 水膜の基本特性	(19)
6.2.2 静止ゲートの水膜振動特性	(19)
6.2.3 加振ゲートの水膜振動特性	(20)
6.3 三次元越流水膜の振動特性	(22)
6.4 水膜振動の伝播特性	(24)
7. 考 察	(25)
7.1 水膜振動の分類	(25)
7.2 鉛直落下水膜とフラップゲート越流水膜の相違	(25)
7.3 低周波空気振動による音圧レベルの推定	(25)
7.4 振動防止対策	(26)
7.4.1 基本的な考え方	(26)
7.4.2 水膜振動の三次元性と振動防止の考え方	(26)
7.4.3 スポイラ設置の現状と問題点	(26)
8. 結 論	(27)
9. あとがき	(27)
謝 辞	(28)
参考文献	(28)

1. ま え が き

河川の堰やダムの越流式ゲートおよび防砂ダム等において、特定の放流時に越流水膜の振動による低周波空気振動が発生することがある。これに伴い、ゲートや管理橋が振動したり、周辺の家屋の窓などがガタついたりする問題が生じている。この水膜振動現象は、水膜、水膜背後の空洞、ゲート形状による水膜放出部特性、落下高などが複雑に関係したものであるため、従来から発生源と増幅機構の考え方に混乱が生じている。

水膜放出部であるゲート自体が弾性支持された場合には、自励振動が発生する条件を検討した研究があるが、砂防ダムのような固定堰においても同種の現象が見られることから、水膜自体の特性を解明する必要がある。

本研究は、この振動機構を明らかにするために、関係するパラメータを独立して取扱うための鉛直落下水膜モデル、ダム越流部に設置されるダムフラップゲート越流水膜モデルおよび水膜の越流幅や従来からの振動防止対策である「スポイラ」の効果を検討するための三次元越流水膜モデルを用いて振動発生条件と発生周波数を調査したものである。これらにより、水膜振動発生機構を明らかにするとともに、低周波空気振動の伝播に伴う音圧レベルの予測ならびに越流式ゲートにおける振動防止対策の考え方を提案する。

なお水膜の振動現象は、重力加速度と共に水の表面張力の影響が非常に大きい現象と考えられ、仮に縮尺模型により現象を再現することを試みた場合には、水膜流速による水膜の安定条件により振動が発生しないことが予想される。従って本研究では、可能な限り実機ゲートに近い水理模型実験を行い、模型の縮尺効果を排除している。

2. 水膜振動発生事例

越流式ゲートとは、図-2.1のようにヒンジを中心に回転する起伏式ゲートや越流式のローラゲートなどを言うが、ゲート背面に越流水膜と扉体および側部堰柱により閉ざされた空洞を形成することが特徴的である。ここで越流水膜は、両面を大気にはさまれた不安定な状態であり、上下面の圧力のバランスがくずれるとゲート部における水膜放出角度が変わり軌跡が容易に変化する。この時、下面の空洞に圧力変動を生じ、水膜の落下時間とこの圧力変動周期がある条件を満足

すれば水膜振動が自動的に継続されることになる。この水膜振動の概念図を図-2.2に示す。

一方、砂防ダム等の場合には起立するゲート部がないため、常に一定の天端標高から水膜が放出され、同様に水膜とダム下流面とにはさまれた空洞を形成する。ただし越流式ゲートとの相違は、側部に堰柱はないため空洞両端が開放されていることと、一般にゲートに比べて長径間かつ高落差であることである。

水膜振動の実測例として、図-2.3に示す扉高4.2 m、径間長10.8 mの越流形の2段式ローラゲートで発生した水膜振動の状況を写真-1(a), (b)に、また、計測された低周波音圧レベル(SPL)と越流水深(h)の関係を図-2.4に示す。測定ゲート以外の放流の影響で計測時により起点音圧レベルが異なるため、個々の値は

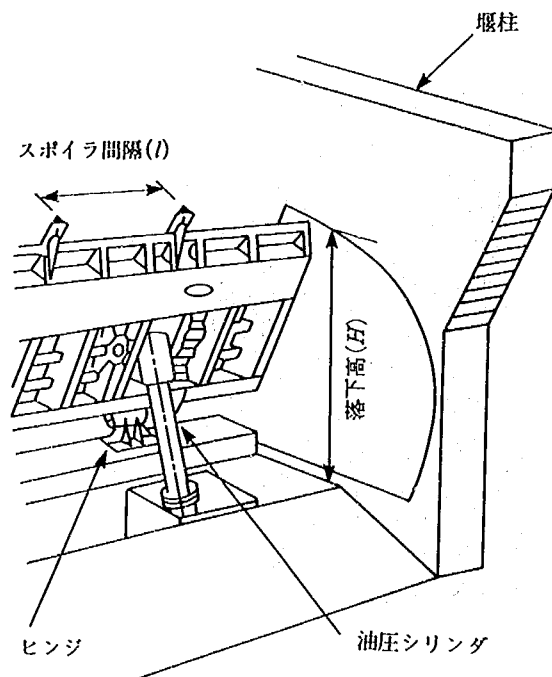


図-2.1 越流式ゲートの例（ダムフラップゲート）

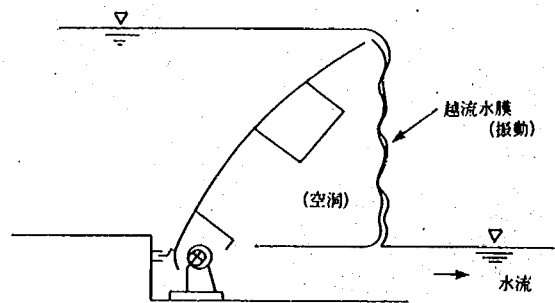
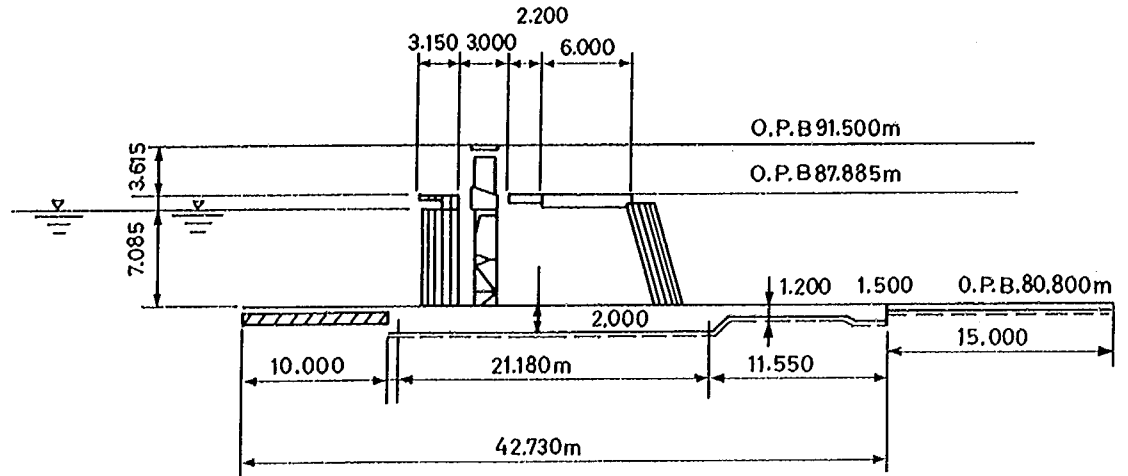


図-2.2 越流水膜振動の状況



側面図



写真-1(a)

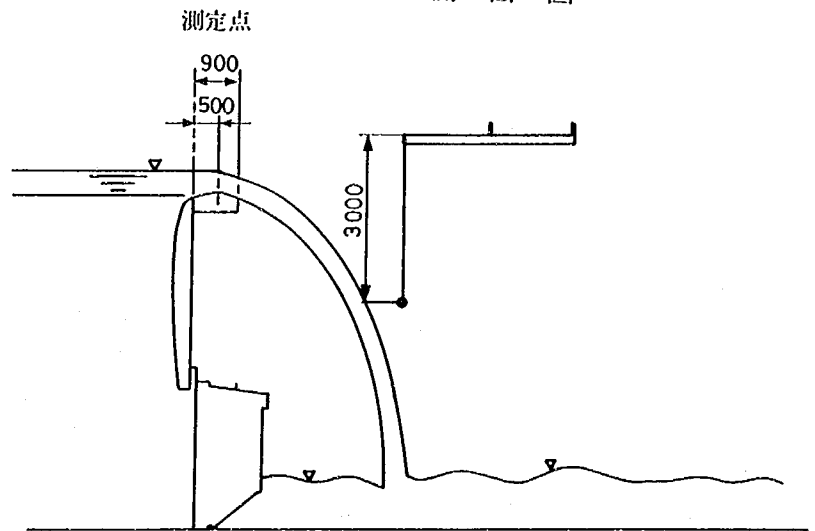


図-2.3 二段式ローラゲート諸元

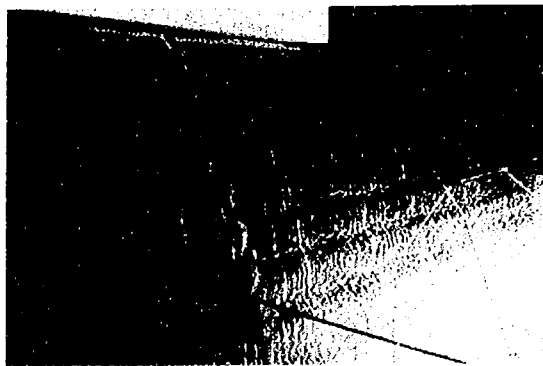


写真-1(b)

一致しないが、越流水深 15~20 cm 程度で最大音圧を与える傾向は一致している。なお、実物ゲートには振動防止用のスポイラが設置されているが、計測はこれを取りはずしてその有効性を確認したものである。

図-2.4 には、可聴域における聴音レベル (A 特性) の変化も合わせて示しているが、顕著なピークを有する低周波域の傾向とは異なり、水膜振動の発生の有無にかかわらず水流が落下するエネルギーに対応した傾向を示している。従って、これから述べるように、水膜振動の発生領域を確認する実機あるいは実験の計測においては、特に低周波音特性が重視されなければならない。

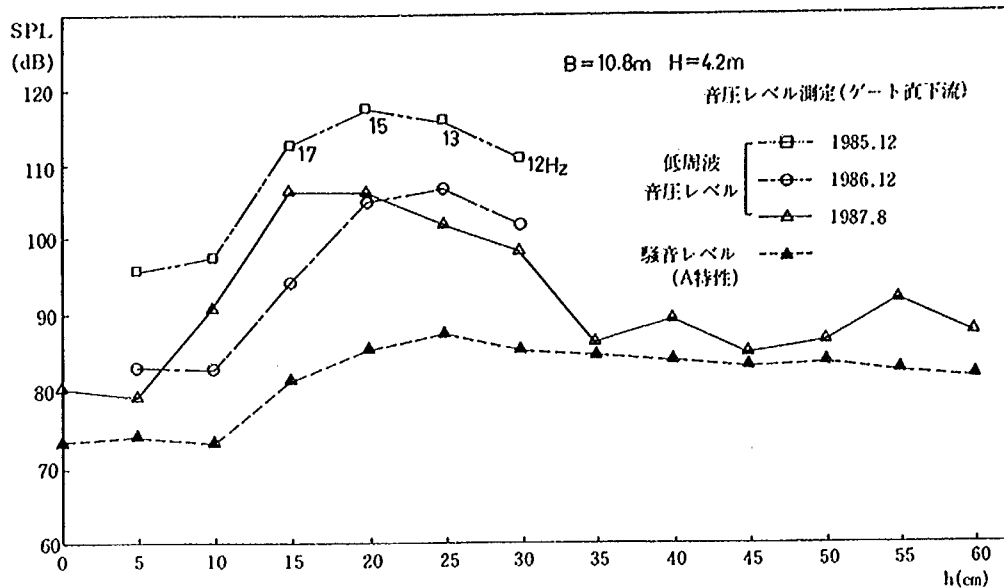


図-2.4 低周波空気振動事例 (音圧レベル)

3. 水膜振動機構

振動機構の発生源として次の可能性が存在する。

(1) 放出部の乱れ 放出部で流速に応じたエッジと水流のせん断渦,あるいは放出部自体の振動が水膜全体に伝播している。

(2) 落下音圧(衝撃) 落下音圧により水膜が直接加振されるものであるが,落下音の周波数成分はランダムであり,後述の水膜又は空洞の固有値による選択共振がないと周期的な加振力には成り得ない。一方,落下衝撃が放出部自体の振動を引き起こす場合がある。

次に,振動の増幅機構として次の事項が考えられる。

(A) 水膜の固有値

水膜に固有値(固有周波数)があり,上記の発生源

の周波数と一致した場合,水膜の振動はその振幅を増大する。その他の周波数の場合は減衰の方が強く振動として継続しない。ただし水膜が固有値で振れようとする力は弱く,放出部自体(ゲート等)の振動の起振力が大きければその周波数成分が卓越する。

(B) 空洞の固有値 水膜と背後の壁面で構成される空洞は次のような固有値(固有周波数)を有する。

- ① 気柱振動—空洞内に生ずる定在波の固有周波数
- ② 空洞振動—水膜のマスと空気のパネ効果で決定される固有周波数

これらの増幅機構は,発生源の周波数と必ずしも一致しなくても,ランダムなノイズの中から選択共振して自動的に水膜振動へ返って行くと考えられる。以上の振動機構をブロック図にしたものが図-3.1である。

(C) 水膜の不安定性 これは増幅機構と言うよ

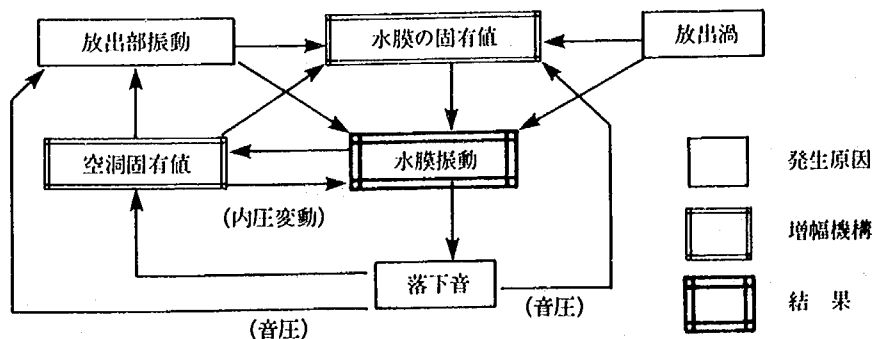


図-3.1 水膜振動機構ブロック図

り、水膜振動の発生限界を導くもので、密度差を持つ二層流体が相対速度を持って接する場合の境界面の不安定性が水膜振動になると考えるもので、W. Hagerlyが扱った例がある。これは、(1)、(2)の発生源が存在したとしても、水膜振動に発展するか否かを分けるもので、表面張力や水膜と空気の相対速度により決定される。

4. 本研究の目的および内容

4.1 鉛直落下水膜モデル

前項のように推定された振動発生原因および増幅機構のうち、どの現象が支配的となるかを、それぞれのパラメータを独立して設定可能な鉛直落下水膜モデルにより確認する。以下に予想される項目ごとの検討方法を整理する。

(1) 放出部の乱れについて

① 放出部形状変化

形状変化（ストロハル数変化）により発生周波数への影響調査

② 落下初速変化

初速変化（ストロハル数変化）により発生周波数への影響調査

(2) 落下音圧（衝撃）について

③ 落下点変化

落下点の性状により発生音圧を変化させ水膜への影響調査

(3) 空洞固有値について

④ 水膜厚変化

水膜厚変化により発生周波数への影響調査（気柱振動/空洞振動）

⑤ 空洞容積変化

空洞容積変化により発生周波数への影響調査

⑥ 水膜幅変化

水膜幅変化により発生周波数への影響調査

(4) 水膜の不安定性について

⑦ 落下初速変化

初速変化により発生領域への影響調査

⑧ 落下高変化

落下高変化により発生領域への影響調査

4.2 フラップゲート越流水膜モデル

このモデルに関しては、以下の事項を整理する。

(1) 放出部の乱れについて

① 放流形状変化

オリフィス形式の鉛直落下モデルとオーバーフロー形式のフラップゲートモデルにより発生周波数への影響調査

② ゲート形状変化

直線ゲートと放物線ゲートにより発生周波数への影響調査

③ ゲート加振

静止ゲートと加振ゲートにより発生周波数および振動レベルの影響調査

(2) 空洞固有値について

④ 水膜厚変化

⑤ 空洞容積変化

ゲート開度（起立角）や落下高による空洞容積の変化により発生周波数への影響調査

(3) 水膜の不安定性について

⑥ 落下高変化

落下高変化により発生領域への影響調査

4.3 三次元越流水膜モデル

このモデルに関しては、以下の事項を整理する。

(1) 空洞固有値について

① 水膜厚変化

水膜厚変化により発生周波数への影響調査

② 空洞容積変化

越流幅および落下高による空洞容積の変化により発生周波数および振動レベルへの影響調査

(2) 水膜の不安定性について

③ 落下高変化

落下高変化により発生領域への影響調査

(3) 低周波空気振動の伝播特性について

三次元越流水膜モデルにより、低周波空気振動の音源を確定し、そのパワーレベルならびに伝播による低周波音圧レベルの推定を行う。

5. 実験方法

5.1 実験装置

5.1.1 鉛直落下水膜モデル

実験装置の概要を図-5.1に示す。上流側より来た水は、整流区間を通りスリットへと導かれる。スリットは、スライド式の亚克力板で構成されており、間隔は0~40 mmに可変な構造となっている。水膜背後の空間は移動可能な仕切り板により、容積の変化が可能

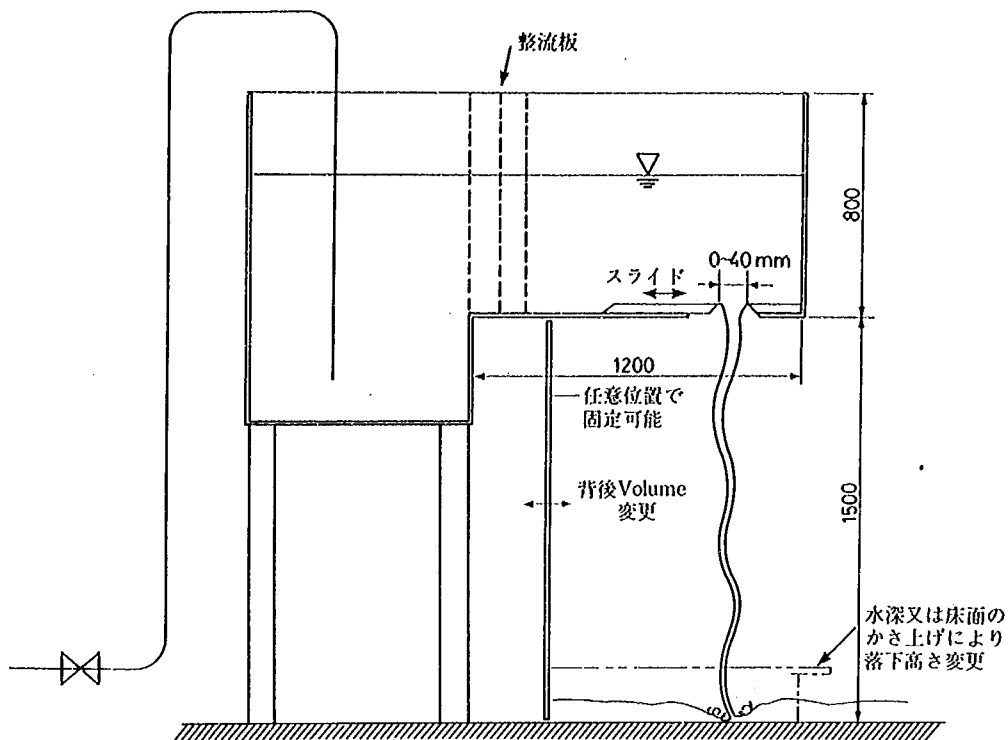


図-5.1 鉛直落下モデル実験装置

となっている。落下高さは、落下面の水深を変化させる方法と、床面を上昇させる方法で変化できる。

なお、空洞を完全に開放する（給気あり）実験では、背後の壁面板および水膜と接しない位置の側面板を取り除いて行った。

写真-2 に水膜振動の状況を示す。

5.1.2 フラップゲート越流水膜モデル

実験装置の概要を図-5.2 に示す。ゲートはゲート背面のロッドにより支持され、このロッドはスライド式のディスクによりモータ軸と直角に連結されており、モータの回転数をインバータにより変更することにより周波数（0～50 Hz）を、またディスクの偏心スライド量により振幅（0～10 mm）を可変可能である。

ゲート形状は、図-5.3 に示す直線形状と放物線形状である。本模型においても、水膜背後の壁面板を一部開放し給気することが可能である。

写真-3 に水膜振動の状況を示す。

5.1.3 三次元越流水膜モデル

実験装置は、図-5.4 に示す落下高 $H=2.5$ m、最大越流幅 $B=6$ m の越流型ゲート模型で、実物ゲートの一部分を等大に抽出したものとする。ゲートに相当



写真-2 鉛直落下水膜の振動

する部分には刃形腹を水面に対して 40° の起立角で固定しており、ゲート部における振動は発生しないものとする。図-5.5 に、越流幅および水膜分断形状を示すが、これらは非越流板を任意位置に設置することにより変化させており、端に非越流板がある場合には側壁から開放されていると判断した。また、落下高については、他の模型を用いて $H=1.5\sim 3.1$ m ($B=0.88, 1.9$ m) の範囲で変化させるものとした。

写真-4, 5 に水膜振動の状況を示す。

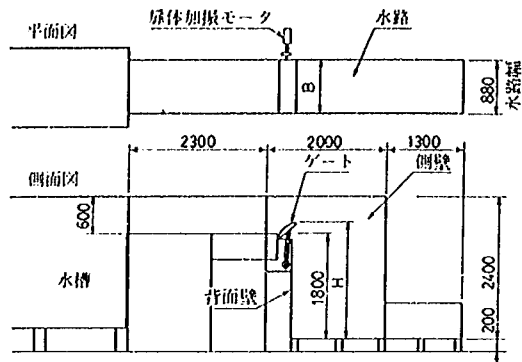


図-5.2 フラップゲート越流水膜モデル実験装置

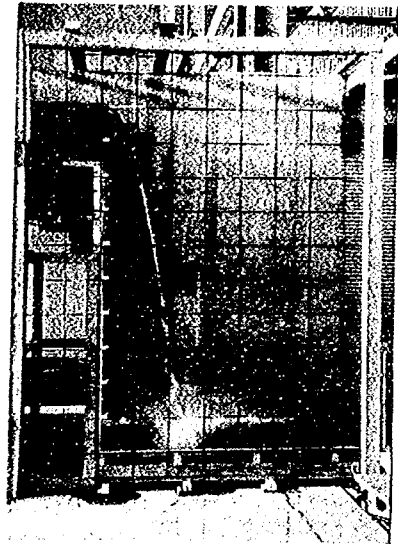


写真-3 フラップゲート越流水膜の振動

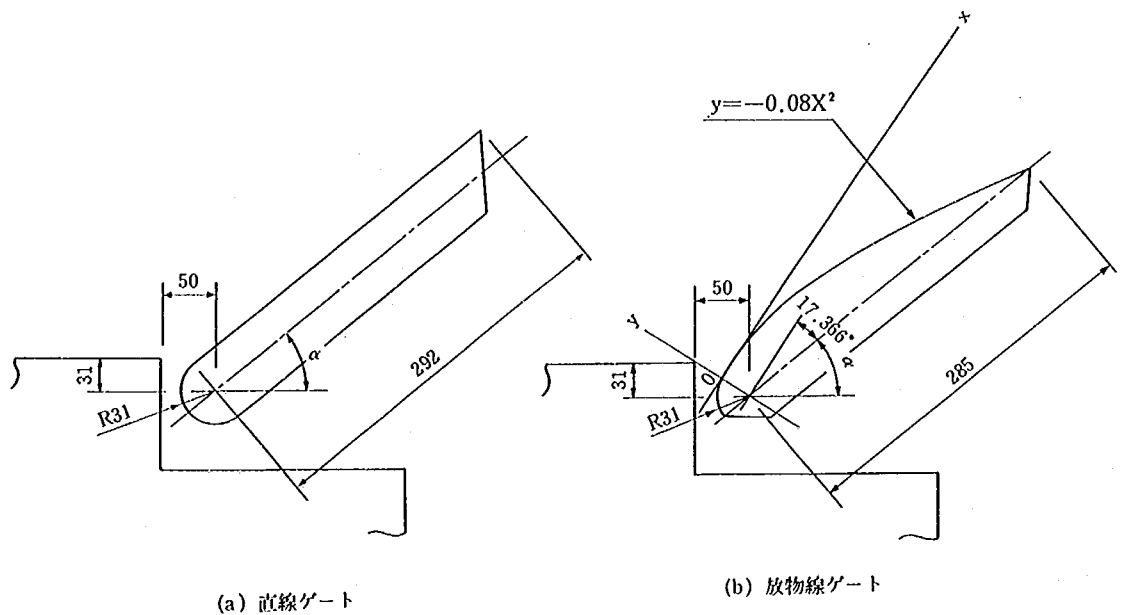


図-5.3 ゲート形状図

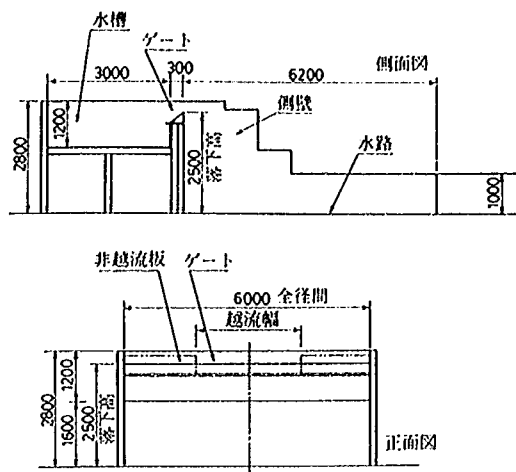


図-5.4 三次元越流水膜モデル実験装置

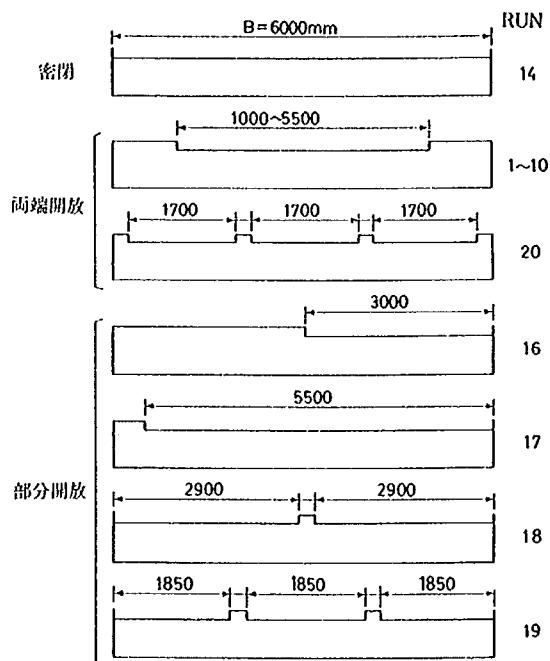


図-5.5 三次元越流水膜モデル水膜分断形状

5.2 実験条件

各モデルの設定条件は次のとおりである。

(1) 鉛直落下水膜モデル

- ① 水膜厚 (スリット幅) ; 5, 10, 15, 20, 40 mm
- ② 落下高 ; 500~1500 mm
- ③ 水膜背後空洞容積 ; 0.12~0.96 m³, 給気
- ④ 落下初速 ; 2~4 m/s
- ⑤ 入口形状 ; 3 形状 (エッジと上流側にガイドを

取り付けしたもの)

(2) フラップゲート越流水膜モデル

- ① 越流水深 ; 20~70 mm
- ② 落下高 ; 1300, 1800 mm
- ③ 給気 ; 有, 無
- ④ ゲート起立角度 ; 20°, 40°
- ⑤ ゲート形状 ; 直線, 放物線
- ⑥ ゲート加振 ; 0 (静止)~50 Hz (5 Hz ピッチ)

(3) 三次元越流水膜モデル

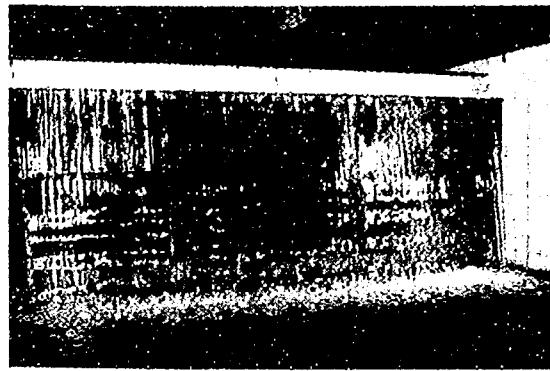


写真-4 三次元越流水膜の振動

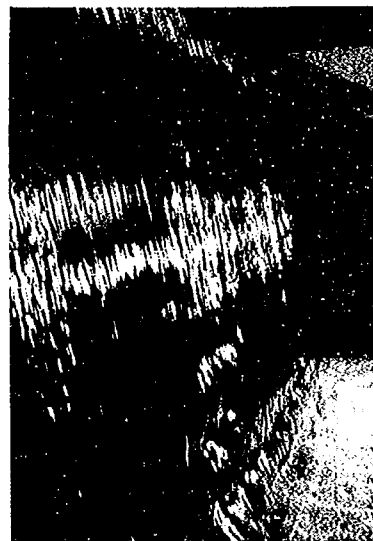


写真-5 三次元越流水膜の振動

表-1 三次元越流水膜モデル実験条件表

RUN	放 流 状 態	落下高 H(m)	越流幅 B(m)	扉 体 起立角 a(°)	越 流 水 深 h(cm)
1	両端 開放	2.5	1.0	40	1~10 cm
2			1.5		
3			2.0		
4			2.5		
5			3.0		
6			3.5		
7			4.0		
8			4.5		
9			5.0		
10			5.5		
11	1.8	3.0			
12	密閉	1.5	0.9		
13		1.9			
14		2.5	6.0		
15		3.1	1.9		
16	部分 開放	2.5	3.0		
17			5.5		
18			2@2.9		
19			3@1.85		
20			3@1.7		

検討を行った条件は表-1に示す通りである。

5.3 実験方法および計測方法

水膜振動の発生領域、振動レベルおよび卓越周波数

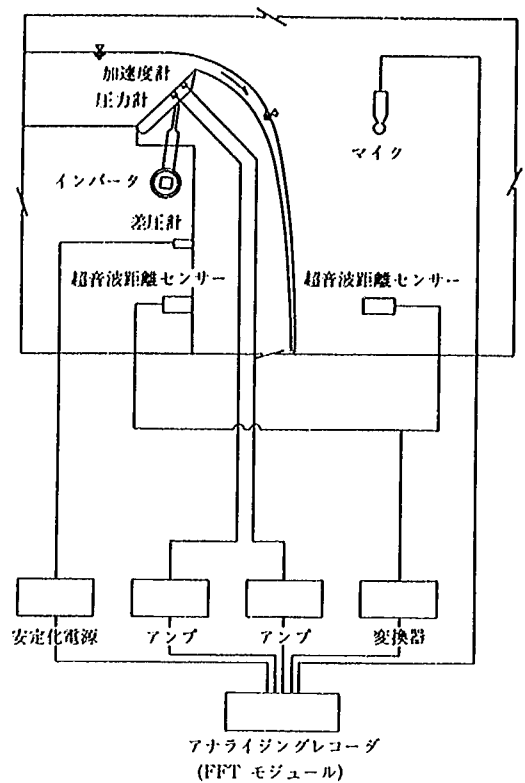


図-5.6 計測器機配置図

を確認するために、各モデルにおいて表-2に示す計測を行った。それぞれの計測器械の配置は、図-5.6（フラップゲート越流水膜モデルの例）に示すとおりである。

実験は、全般を通して設定した実験条件において流量を順次増加し、水膜厚（越流水深）ごとの計測を行っている。鉛直落下水膜モデルでは、落下初速とスリット幅が独立となるため、設定スリット幅における上

表-2 計測項目一覧表

計測項目 モ デ ル	低 周 波 音	水 膜 変 位 (表)	水 膜 変 位 (裏)	空 気 室 圧 力	ゲート加速度	ゲート面水圧	ストロボ観察
鉛 直 落 下 水 膜	○	○		○			○
フラップゲート越流水膜	○	○	○	○	○	○	○
三 次 元 越 流 水 膜	○						○

部水深を流量ごとに計測し、落下初速を算出することとした。

一方、ゲート加振実験においては、静止状態で水膜振動を発生する条件において静止状態から順次加振周波数を増加し、水膜振動の発生周波数および振動レベルに対する応答を求めた。

また、実験全般を通して、ストロボスコープを用いて、発光周期を調整することにより、水膜振動形状を見掛け上静止して見えるようにすることにより、水膜振動周波数や振動振幅を視覚的に捉える方法を採用した。

6. 実験結果

6.1 鉛直落下水膜の振動特性

(1) 周波数特性

図-6.1に水膜振動時の空洞内圧力変動のFFTによる分析結果の一例を示す。また、図-6.2に水膜振動時の低周波音の分析結果の一例を示す。

両ケースとも、卓越周波数は一致している。ストロボにより観測される周波数もこれに一致している。騒音による分析結果には倍音、3倍音等がでる場合がある。これは騒音の場合は測定位置の影響を受けることによるものと考えられる。

(2) 落下高の影響

各々の分析結果には、数種の周波数が観測されるも

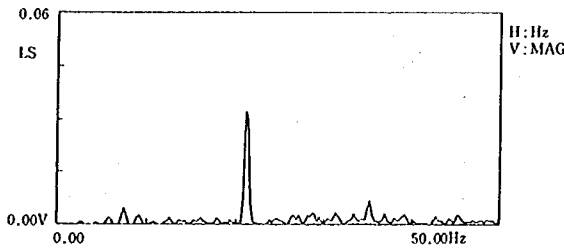


図-6.1 空気室内圧力変動周波数分析例

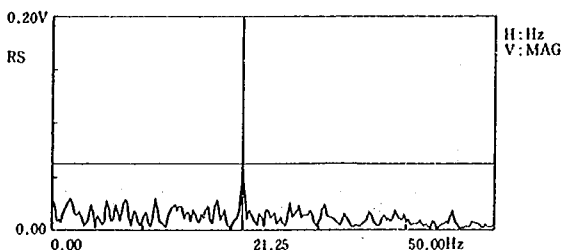


図-6.2 低周波音周波数分析例

のもあり、周波数だけでなくその大小の比較が重要となる。そこで、図-6.3(a)に示すように、レベルの大きさを、円の大小で表し、傾向を見ることとした。横軸は落下高で、この図の場合、水深を変える事により落下高を変えている。

図中の実線は、Schwartz の $K+1/4$ 則(落下高の間に $K+1/4$ 波長存在するとしたもの)を示したもので、 K の値が次数を示している。図中の破線は次式で求められる水膜背後空気と水膜重量によるバネ・マス系の固有周波数(1次)を示したものである。

$$f = C / (2n) \sqrt{(\rho_a S_w) / (V \rho_w h)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 C ：空気中の音速、 ρ_a ：空気の密度、 ρ_w ：水の密度、 V ：空洞の容積、 S_w ：水膜の面積、 h ：水膜の厚さ

床面高さを定めることにより、落下高を変更したケースについては図-6.3(b)に示す。床面上に落下する場合は、発生周波数が、水面上に落下する場合ほど分散せず、1つに決定される場合が多い。水面落下の場合には、水面変動により境界面が安定せず落下高が変動するとともに、内圧変動も複雑となり、多数モードを取り得ると考えられる。また、水面に落下する場合で背後空洞に給気をした場合については図-6.3(c)に示

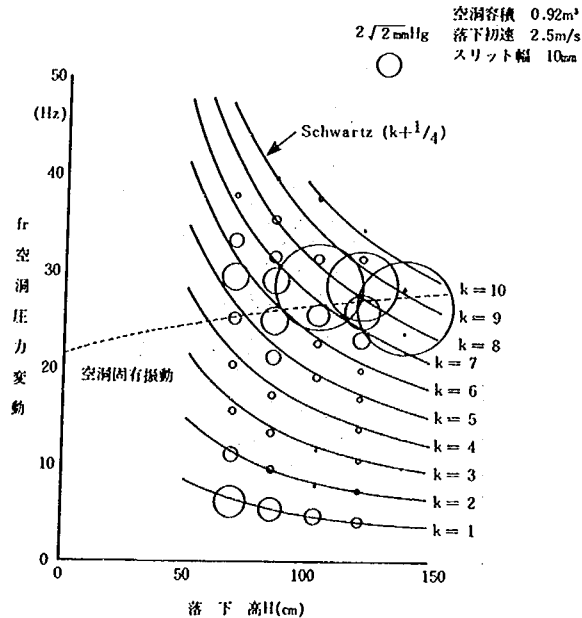


図-6.3(a) 落下点の影響
(落下点に水深の有る場合：給気なし)

ず。

空洞を伴う場合の落下高変化による周波数変化は、Schwartz の $K+1/4$ 則で予想されるものとは、異なる。

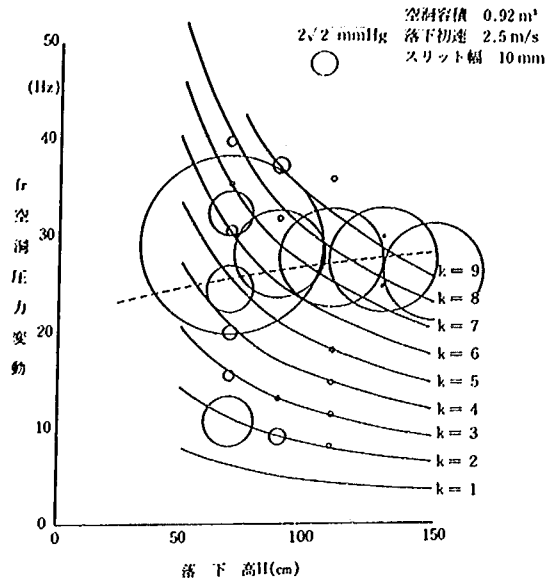


図-6.3(b) 落下高の影響
(落下点に水深の無い場合：給気なし)

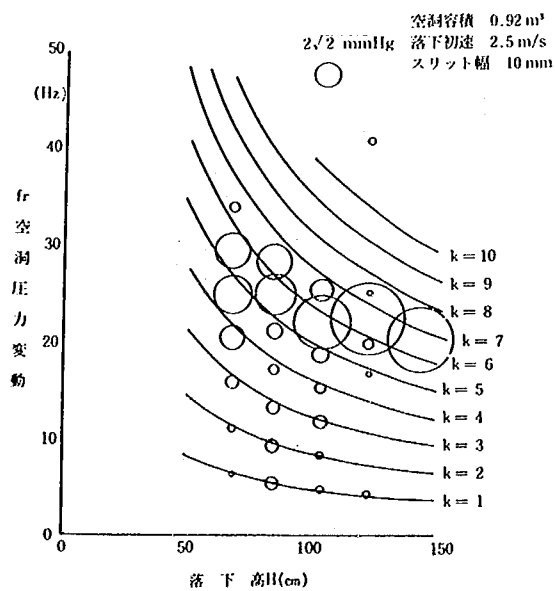


図-6.3(c) 落下点の影響
(落下点に水深の有る場合：給気あり)

っている。落下高に因らずほぼ一定値で空洞と水膜重量で決定される固有値の変化傾向にほぼ等しい。ただし、落下高が低くなると、Schwartz の低次モードが顕著となってくる。

給気をした場合は、Schwartz のラインには乗らないものの変化傾向は等しく、落下高内での振動の波数を一定に保つように変化していく。

(3) 水膜厚の影響

図-6.4(a)に水膜厚を変化させた場合の落下高～発生周波数のグラフを示す。卓越周波数を拾い再整理すると図-6.4(b)の様になる。厚みの減少と共に、周波数は上昇傾向にある。ただし、空洞水膜重量のマス・バネ系で決定される周波数とはスリット幅 10 mm の場合を除き絶対値が異なっている。水膜厚の上昇と共に空洞圧力変動レベルが小さくなり、またノイズも多くなり、卓越周波数が明白ではなくなってくる。また、水膜厚が薄くなり過ぎると、水膜は落下途中で飛沫となって、背後空間に通気されるために圧力変動は生じない。完全に給気した場合で振動が観測されたのは、スリット幅 5 mm と 10 mm のみで、15 mm 以上では明白な卓越周波数を持たずに、給気の場合の傾向は明

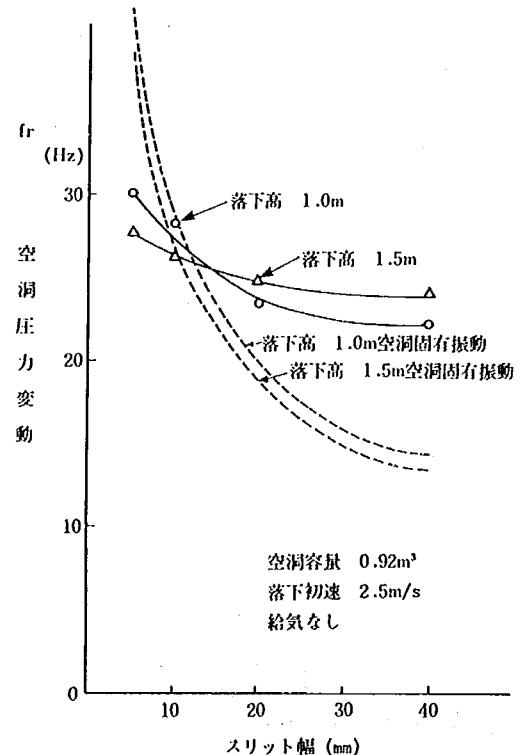


図-6.4(b) 水膜厚の影響

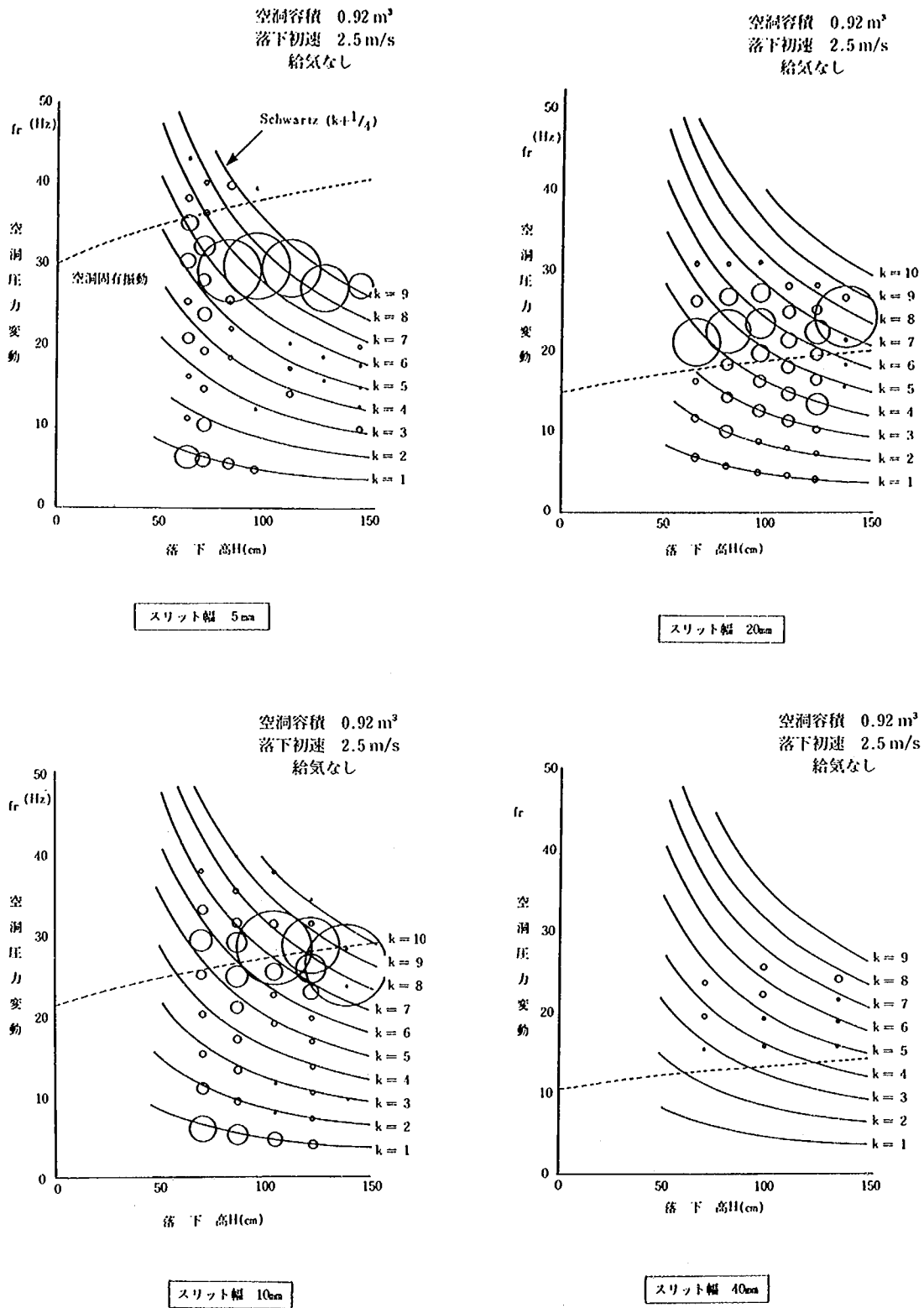


図-6.4(a) 水膜厚の影響

確ではない。

(4) 落下初速の影響

図-6.5 に落下初速を変化させた場合の、周波数変化を示す。流速の増大と共に、周波数は落下高内の波数を一定に保つように徐々に増えていく。そして、ある値に達すると周波数は急に变化する傾向を示す。この

変化が、どのような機構でいつ発生するかは、明確に予測されない。

同図中 W. Hagerty によって示された表面張力や水膜と空気の相対速度によって決定される水膜の不安定限界を示したが、発生周波数はほぼ不安定領域に入っている。上記の周波数決定機構に関与していると考え

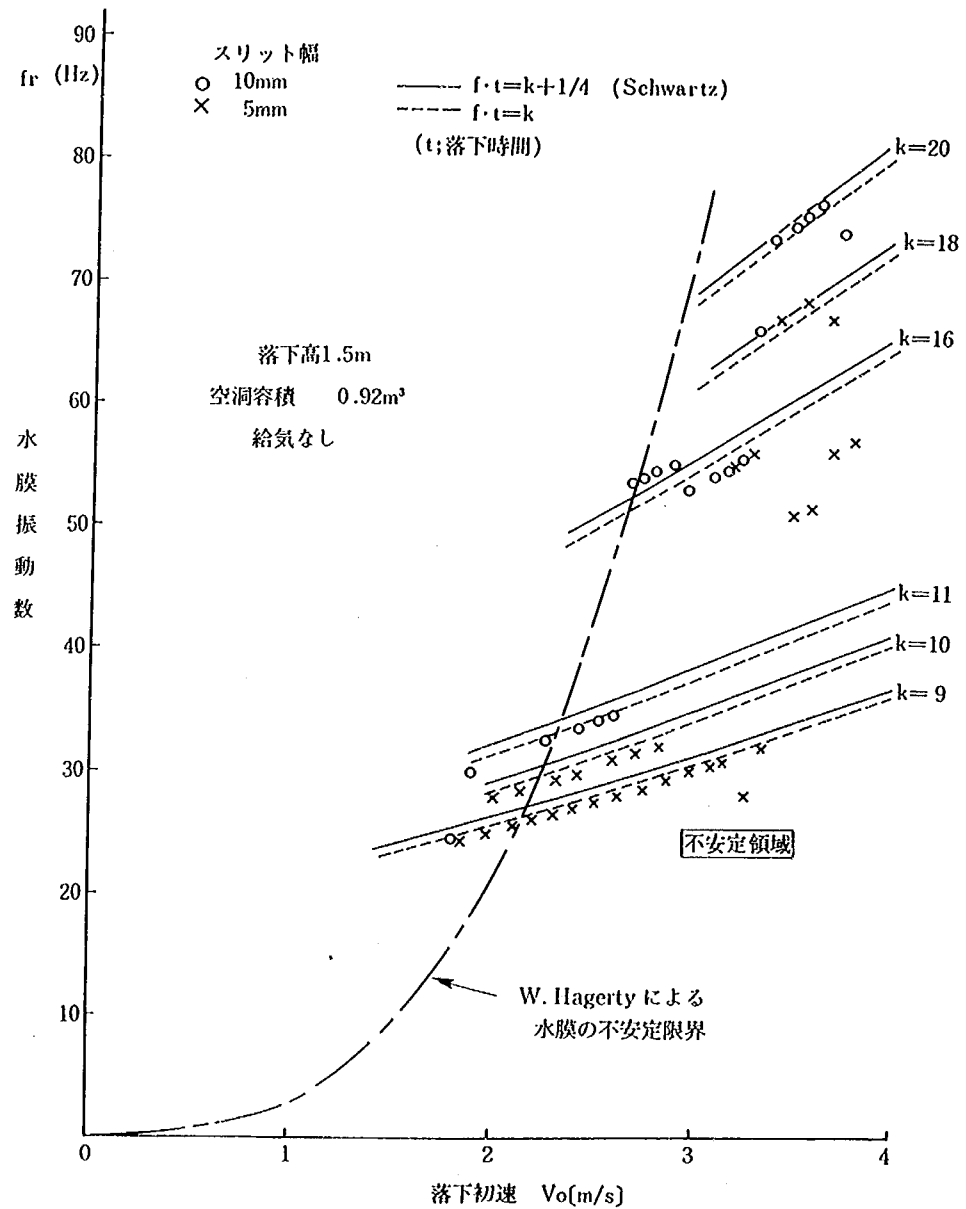


図-6.5 落下初速の影響

られる。

(5) 水膜幅の影響

水膜幅を変えた場合の結果を図-6.6に示す。水膜幅の変化は流出スリットの一部を塞ぐ事により実施した。この時、水膜の両側面を壁面から離す場合と、片側のみの場合で振動しなくなる水膜幅が若干異なった。

幅によらず周波数はほぼ一定となっており、 $d=10$ mmで水膜幅 500 mm、 $d=5$ mmで水膜幅 350 mmまで振動が発生している。(ただし、落下高 $H=130$ cm)

この場合観測されているのは水膜の固有値で、開口の仕方により増幅機構(音圧)の強弱が決定されているものと考えられる。

(6) 空洞容積の影響

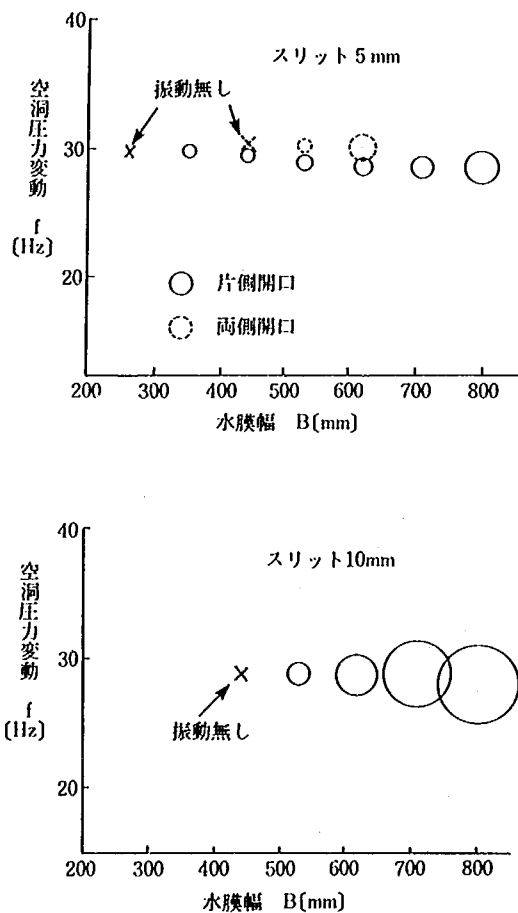


図-6.6 水膜幅の影響

いままでに挙げた図-6.3の落下高変化グラフにより、落下高に応じた空洞容積の変化を見ることは可能であるが、この場合、同時に水膜重量も変化するため両者の影響を分離することができない。そこで、水膜背後の壁面を前後させ、同一落下高で空洞容積だけを変化させる実験を行った。

図-6.7(a)にその結果を示す。空洞容積を横軸に示したものが図-6.7(b)である。ある程度空洞が大きくなると、周波数は一定値となり空洞を完全開放した場合に

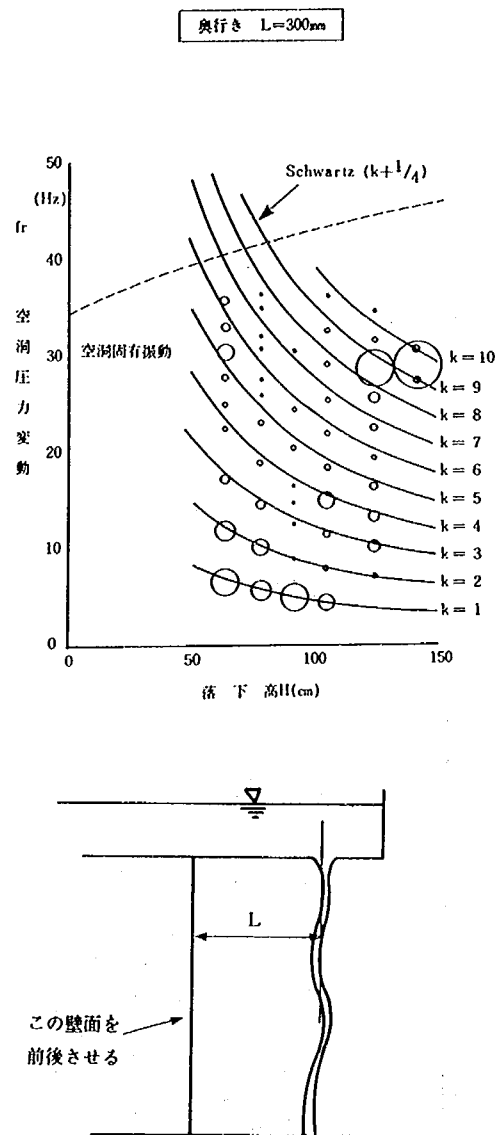


図-6.7(a) 空洞容積の影響

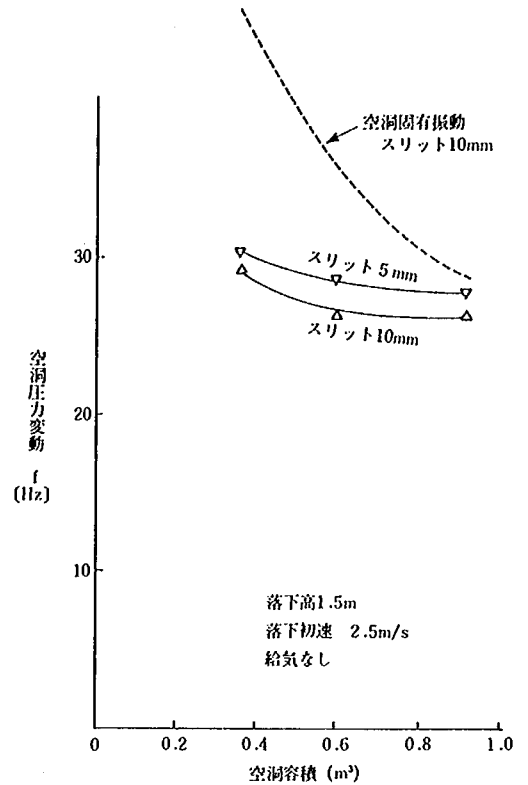
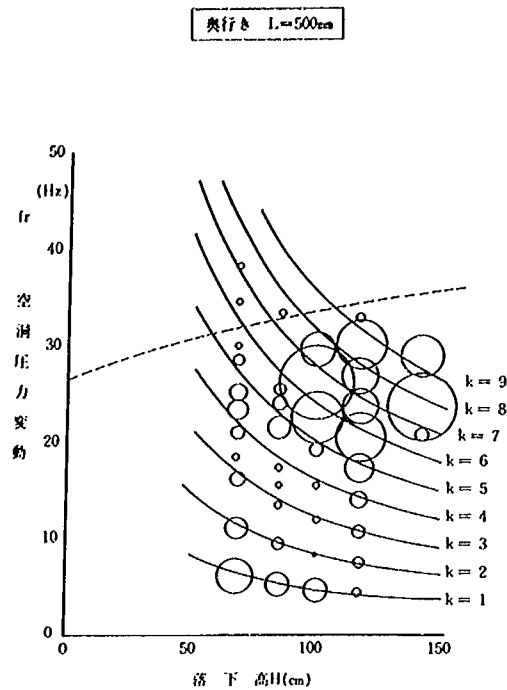
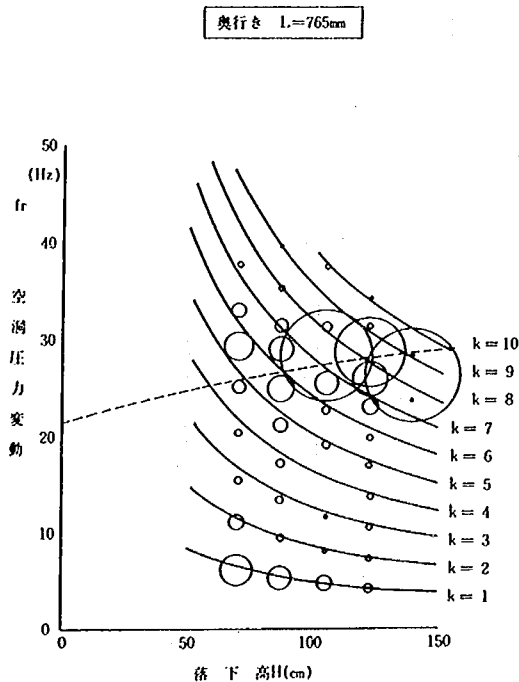


図-6.7(b) 空洞容積の影響



観測される周波数と変わらなくなる。

空洞の役割は水膜加振力の増幅機構に有ると考えられる。空洞が大きすぎると、水膜振動により生ずる圧力変動が非常に弱く、または、水膜が薄い場合は圧力が逃げてしまい、水膜への加振力とならないためと考えられる。

(7) 入口形状の影響

水膜振動の振動数が決定される理由としては以下のものが考えられる。

- ① 水膜の導入部（入口部）との剪断渦（カルマン渦類似）
- ② 水膜落下時の空気との剪断渦（密度差流体の表面波の不安定）

もし、①であれば入口形状を変更することにより、発生周波数は変化するはずである。よって、入口形状を数種変更し振動発生状況を比較したが、発生周波数には大差ない。よって②の方が主な原因となっている事が予想される。

6.2 フラップゲート越流水膜の振動特性

6.2.1 水膜の基本特性

図-6.8に直線ゲートの放流軌跡を示す。これによると、空洞が給気されている場合には越流水深にかかわらずほぼ一定の軌跡を示すことが明らかである。

一方、空洞が給気されていない場合には空洞が負圧となり水膜が引っ張られて空洞容積は減少する。この場合、空洞の容量比から算出した負圧の値は実験値とほぼ一致する。

6.2.2 静止ゲートの水膜振動特性

(1) 越流水深の影響

水膜振動の発生周波数は、低周波音や空気室圧力変動により測定しているが、卓越周波数は共通であり、ここでは代表して低周波音による結果を示す。図-6.9(a), (b), (c)に示すように、越流水深による発生周波数の差はほとんど見られない。これは、振動に影響するのは主に鉛直方向成分であり、同一角度であれば越流水深が上がり水平方向速度は上昇しても鉛直方向は大

差なく周波数が変化しないためと考えられる。

(2) 落下高の影響

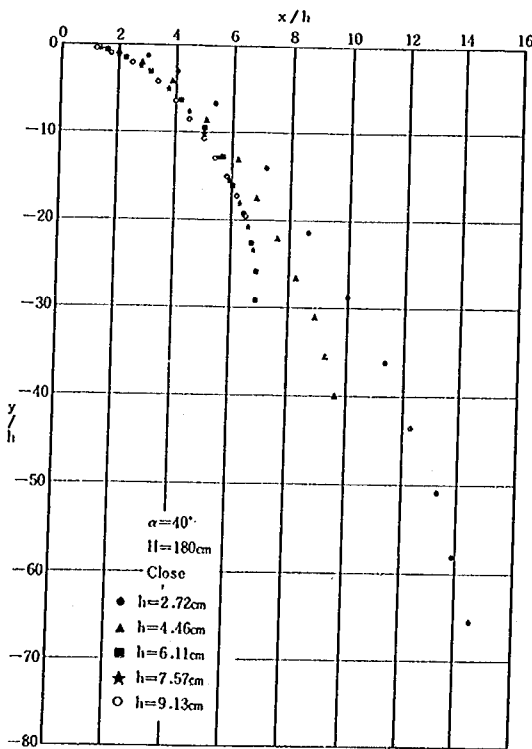
図-6.9(b), (c)に示すように、ゲート起立角 20° では、落下高を変えることにより 17 Hz から 21.5 Hz に変化しているが、 40° では、落下高による発生周波数の差はなく、 20.5 Hz が現れている。

(3) 給気の影響

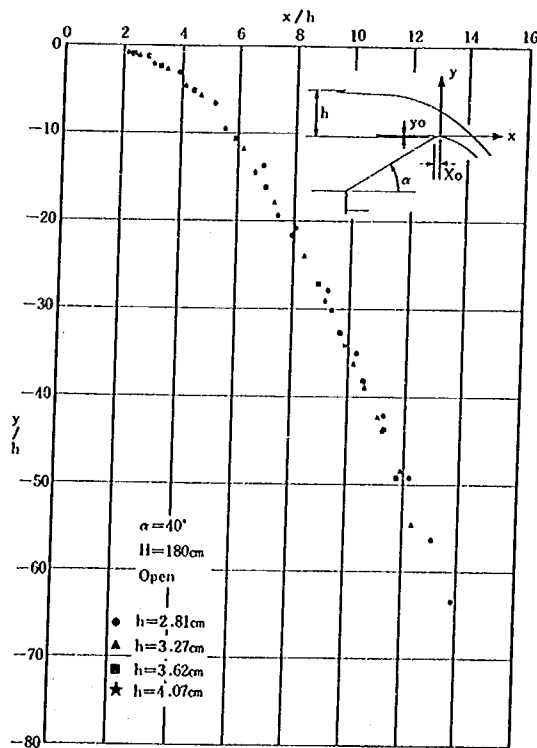
図-6.9(a)によると、給気により振動発生領域は明らかに狭く限定される。例えば、ゲート起立角 40° 、落下高 180 cm において、越流水深 6.54 cm まで（給気なし）が 2.81 cm まで（給気あり）となっている。この傾向は 20° においても同様である。

(4) ゲート起立角の影響

図-6.9(b), (c)に示すように、直線ゲートのゲート起立角 20° と 40° においては、発生周波数に明確な相違は認められない。これは、起立角による落下高の相違は小さく、また放出点が刃型形状になっている点が共通であるためと推定される。一方、放物線ゲートの場合は、起立角により越流面の曲率が影響し易くなるた



(a) 給気なし



(b) 給気あり

図-6.8 放流軌跡 (直線ゲート)

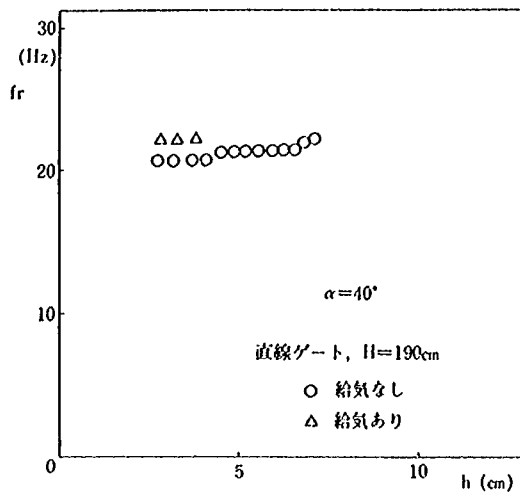


図-6.9(a) 静止ゲートの振動周波数
(給気の影響)

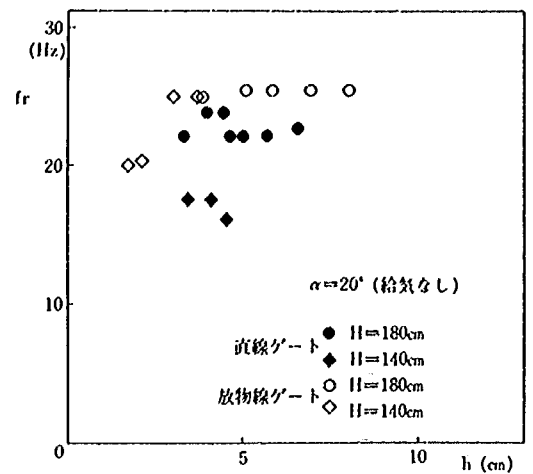


図-6.9(c) 静止ゲートの振動周波数
(ゲート形状および落下高の影響: $\alpha=20^\circ$)

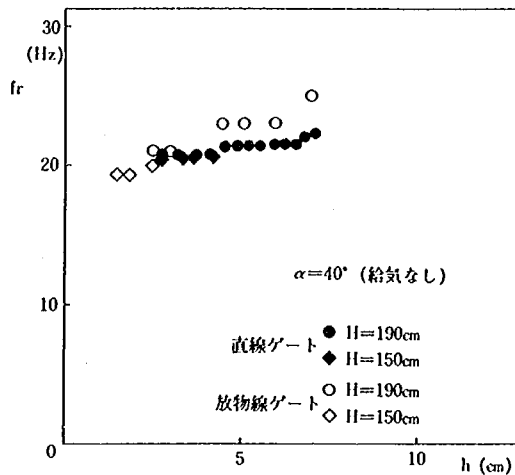


図-6.9(b) 静止ゲートの振動周波数
(ゲート形状および落下高の影響: $\alpha=40^\circ$)

めに発生周波数に相違があると考えられ、これを次項に示す。

(5) ゲート形状の影響

直線ゲートと放物線ゲートの発生周波数の相違を図-6.9(b), (c)に示す。ゲート起立角 $\alpha=20^\circ$ では放物線ゲートのほうがやや高い周波数となったが、 $\alpha=40^\circ$ では両方ともほぼ同じ周波数であり、越流面形状が振動周波数に与える影響は小さいと考えられる。 $\alpha=20^\circ$ の場合に若干変化したのは、越流面形状により放出点の流速分布が変化したためではなく、むしろ、越流面の曲率と起立角の影響を受けて放出点の鉛直方向流速が大きくなり、全体的に水膜の流速が速くなったためと考えられる。この傾向は、鉛直落下モデルで落下初速を

増加させた場合に振動数が上昇した結果と一致する。また、越流面形状による放出点の流速分布が大きな要素ではないことは、越流面に粗度を付けた場合に大きな変化が見られなかった事実からも確認される。従って、放出点がゲートの振動により移動する等の場合でない限り、水膜振動は落下する水膜固有の問題と考えることができる。

6.2.3 加振ゲートの水膜振動特性

ゲート加振実験の目的は、実機のゲートが有する本体と支持機構の系の固有振動数によるゲート面の振動が、水膜にいかなる影響を与えているかを確認するためである。おそらく水膜単独の振動は非常に不安定であり、空洞や構造物の固有振動数が近傍に存在すれば容易に引っ張られてしまうことが予想される。予備実験によれば、ゲートの振動振幅の影響がかなり大きく、水膜の固有値と考えられる振動が現れるにはゲートの先端において円周方向に求めた振動振幅を 0.1 mm まで小さくする必要があり、これより大きいと加振振動数がそのまま水膜振動数になってしまう結果となった。図-6.10(a), (b)に直線ゲートにおける越流高 4.93 cm, 落下高 180 cm の場合の 5 Hz 間隔の加振応答を給気有と無に分けて示している。加振振動数 0 Hz がゲート固定を示し、給気有では水膜振動は発生しないが、加振振動数を上昇させるにつれて 20~30 Hz でピークを有する応答を示した。一方、給気無ではゲート固定で約 20 Hz の水膜振動を生じており、加振振動数が低い場合には変化はなく、15 Hz 程度から強制加振

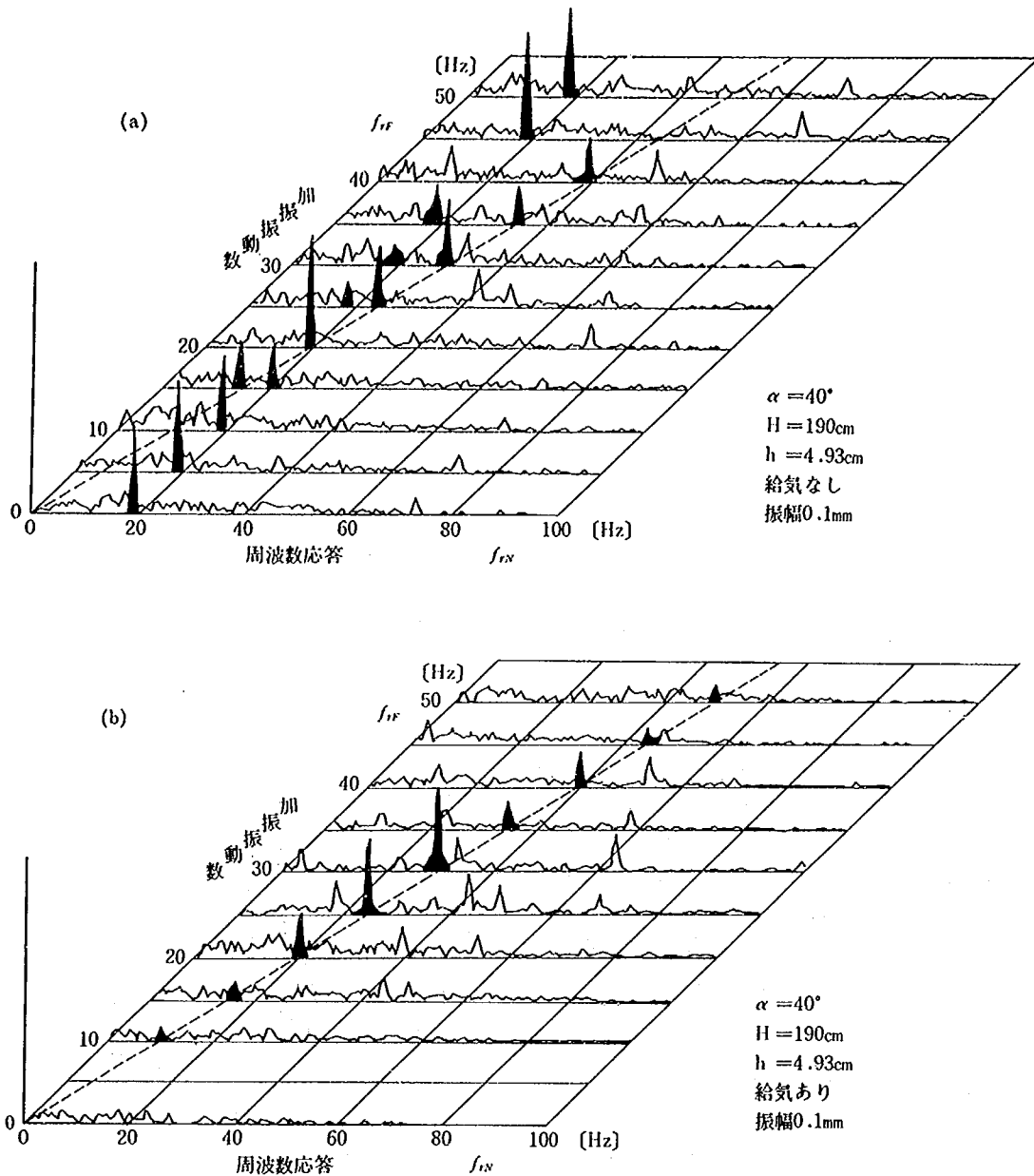


図-6.10 加振ゲートの振動周波数

の振動数に引っ張られる (Locking-in 現象)。さらに加振振動数が大きくなって 45Hz 以上になれば、水膜固有値による水膜振動が復活してくる。

放物線ゲートの場合も同様で、水膜振動周波数 (f_N) に対する加振周波数 (f_F) の比 f_F/f_N が小さい場合は加振の影響はなく、 f_F/f_N が 1.0 に近づくにつれて加振周波数に引張られる現象がみられた。 f_F/f_N がさら

に大きくなると再び加振の影響はなくなってくる。これより、越流水膜が加振周波数に対して応答可能な周波数領域は、 $f_F/f_N = 0.75 \sim 2.0$ と考えられ、ゲート構造を考えると、この範囲を外して設計することが望ましい。また、水膜振動が強く発生しているとき、その振動周波数近傍で扉体を加振すると、水膜振動単独の音圧レベルより低い音圧レベルになった。これは、

振動数の微妙なずれが、水膜振動単独の振動を乱したためと考えられるが、逆に水膜振動の発生が弱いときには、加振により高い音圧レベルとなることが明らかとなった。これらの傾向は直線形ゲートと同様であり、越流面形状が与える影響は小さいようである。

6.3 三次元越流水膜の振動特性

(1) 越流幅の影響

落下高 2.5 m の一定条件において、越流幅を 1.0 m ～ 5.5 m と変化させた場合の低周波音圧レベルの変化を図-6.11 (a) に示す。図には、水膜振動の大きさを比較するために次式で定義されるパワーレベル (PWL) を用いている。

$$PWL = SPL(r) + 20 \log r + 8 \text{ (dB)} \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 r : 水膜から測定点までの距離 (m)

$SPL(r)$: r 地点での音圧レベル (dB)

越流幅にかかわらず、ある特定の越流水深で PWL が最大となる傾向は先に示した実物ゲートと同様であるが、越流幅の増加により最大 PWL (以下 $PWL_{\max}$ と呼ぶ) を与える越流水深 (以下 $h_{\max}$ と呼ぶ) が大きくなっていることが確認される。

また、低周波空気振動を対象としない越流水脈の落下騒音の研究によれば、落下音の PWL は越流幅と落下高と水脈の質量によって示される水流の落下エネルギーに関係すると考えられる。しかしながら、今回得られた $PWL_{\max}$ は、後述するように、越流幅に関して水流の落下エネルギーだけでは説明されず、越流幅により振動レベルが変化して、単位幅当りの低周波音の PWL が異なっていることが考えられる。

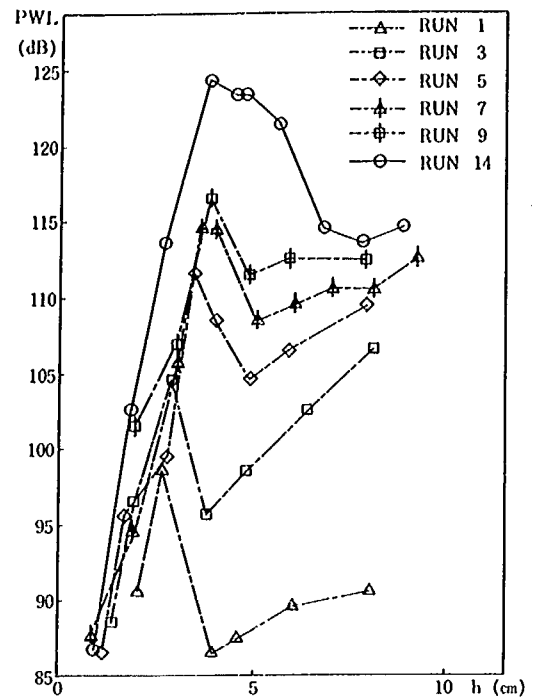
(2) 水膜分断の影響

水膜の端部を側壁から離して開放した RUN 5 と 16 および RUN 9 と 17 を比較すると、図-6.11 (a), (b) に示すように同じ越流幅 3.0, 5.0 m において $PWL_{\max}$ に約 10 dB の相違があり、両端を開放すると音圧レベルが低減される。しかしながら、RUN 14 と 17 ではわずか 1 dB の差しかなく、片端のみの開放では水膜振動に大きな影響を及ぼさない。

次に、水膜の中央における分断においては、RUN 18, 19, 20 と分断箇所が増えるほど $PWL_{\max}$ が低下し、水膜を中央で分断した RUN 18 と端部で分断した RUN 17 が同程度であることは興味深い。なお、越流幅 6 m における今回の最大である RUN 14 と最小である RUN 20 の $PWL_{\max}$ の差は約 18 dB である。

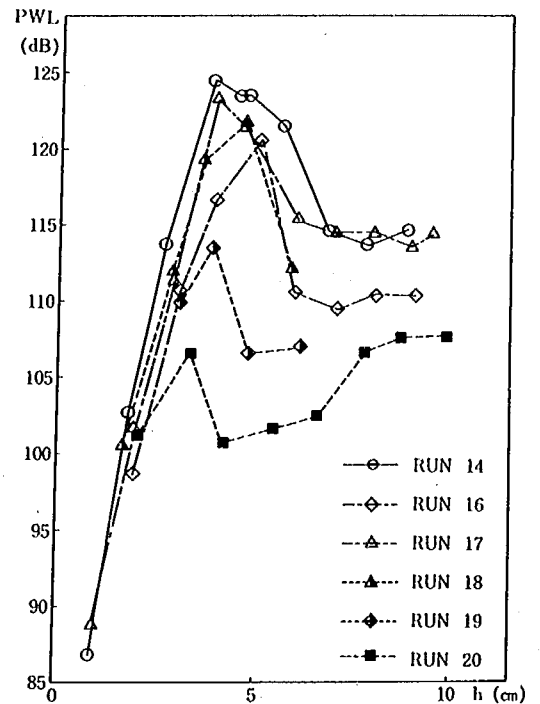
(3) 落下高の影響

図-6.11 (c) に落下高の異なる RUN 12～15 の音圧レ



(a) 越流幅の影響

図-6.11 (a) 越流幅の影響



(b) 水膜分断の影響

図-6.11 (b) 水膜分断の影響

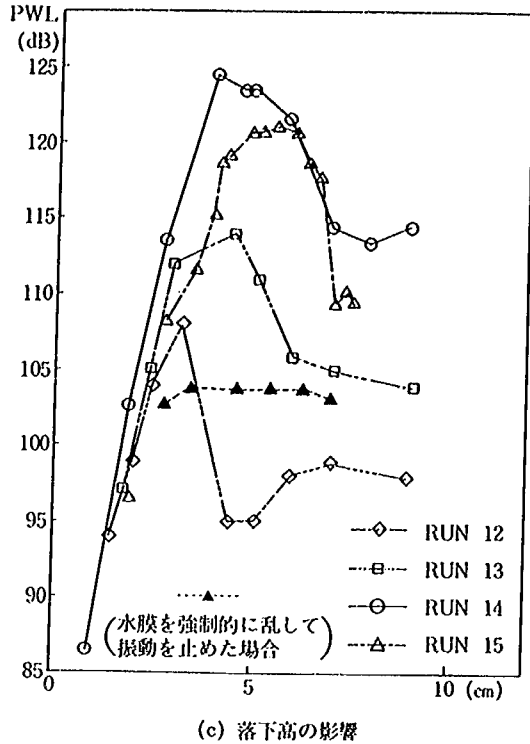


図-6.11(c) 落下高の影響

ベルを示すが、図-6.11(a)の越流幅の場合と同様に、落下高が大きくなるに従って、 PWL_{max} および h_{max} が大きくなっている。特に、RUN 12 と 13 は同一越流幅であるが約 6 dB の差があり、水流の落下エネルギーの PWL の差よりもかなり大きな結果である。また、RUN 15 については、全実験条件の中で最も大きい h_{max} を示しており、「落下高が大きく、流速が増大するほど厚い水膜でも振動する」という、これまでの研究成果を裏付けるものとなっている。なお、RUN 14 と 15 が逆転しているのは、越流幅の相違によるものである。図-6.11(c)には、RUN 15 において水膜を強制的に乱して振動を完全に止めた場合の音圧レベルも合わせて示しているが、これが水流による落下エネルギーに相当していると考えられ、ここでは約 18 dB の差が認められる。

(4) 音圧レベル最大時卓越周波数

低周波音レベル計の出力波形から求められた卓越周波数を図-6.12 に示すが、越流幅に関してほぼ一定であり、水膜振動は周波数に関して 2 次元性を保っていると考えられる。一方、落下高に関しては $H=1.8\sim 2.5$ m 範囲でほぼ 21~22 Hz であり、 $H=3.1$ m の 27

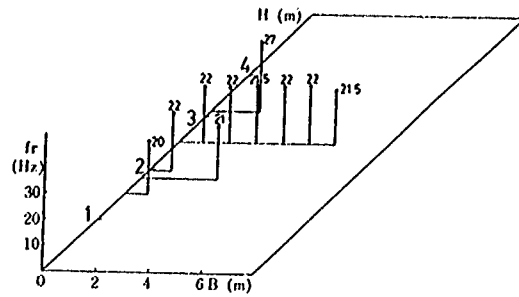


図-6.12 音圧レベル最大時卓越周波数

Hz と $H=1.5$ m の 20 Hz のみが異なる傾向を示している。従来から、落下高が周波数を決定する報告が示されており、落下水膜に含まれる波数 (Schwartz の $k+1/4$ 則の k) が増大する考え方と同様の結果と考えられるが、実験条件が少ないために、明確な結論を導くことは困難である。

(5) 最大音圧を与える越流水深

図-6.11(a), (b), (c) に示した PWL と越流水深の関係から、 h_{max} を越流幅ごとに示したものが図-6.13 である。両端開放 (RUN 1~10) 条件においては、越流幅の増大とともに h_{max} が大きくなっており、長径間になるほど水膜の厚い状態でも振動することになる。この理由は、水膜端部では縮流の影響によりゲート部での越流幅と落下点の水膜幅が異なり、特に越流幅が小さい場合には落下点付近の水膜が厚くなってしまうためと考えられる。また、スポイラで水膜を分断した RUN 19 と 20 の場合には、複数の水膜が存在しても h_{max} は単独の場合と同様と考えられる。両端密閉の場合および落下高の影響については、明確な結論を導くことは困難であるが、落下高が高く、密閉状態であるほど h_{max} が大きくなるものと考えられる。

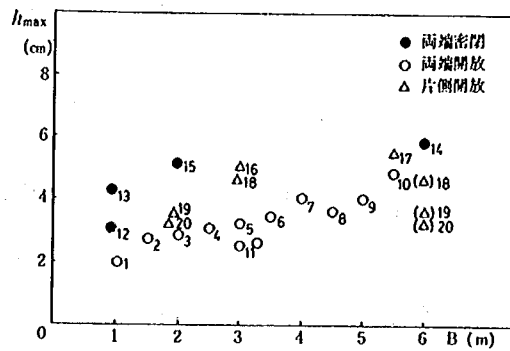


図-6.13 音圧レベル最大時越流水深

6.4 水膜振動の伝播特性

図-6.14 に RUN 15, $h=5.5$ cm における水膜中央断面内の音圧レベル分布を示す。これより、低周波空気振動は水膜全体の面音源ではなく落下点における線音源であることは明確である。また、その分布特性は、水平下流、鉛直方向ともに等方的と考えられるが、底面付近は反射の影響で若干高い音圧レベルを示している。

そこで、水膜を図-6.15 に示すように幅 B の線音源と考え、測定点までの無次元距離 r/B で $SPL(r)$ を整理すると図のように実験条件にかかわらず一定の減衰傾向を示すことになる。これは、騒音の減衰特性と同様であり、 $r/B \leq 0.2$ 程度で倍距離 3 dB の無限長線音源 ($SPL(r) = PWL - 20 \log r - 8$)、 $r/B \geq 1.0$ 程度で倍距離 6 dB の有限長線音源 ($SPL(r) = PWL - 10 \log r - 8$) に近似される。ここで図-6.15 においては、水膜端部が側壁に接している場合に、側壁が音響的に反射面となって音源が長くなる(音響映像)ため、減衰特性をもとに(3)式に示す越流幅の補正を近似的に行っている。

$$B' = a \cdot B \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 a ：越流幅補正係数 (1.5～両端密閉, 1.25～片端開放, 1.0～両端開放)

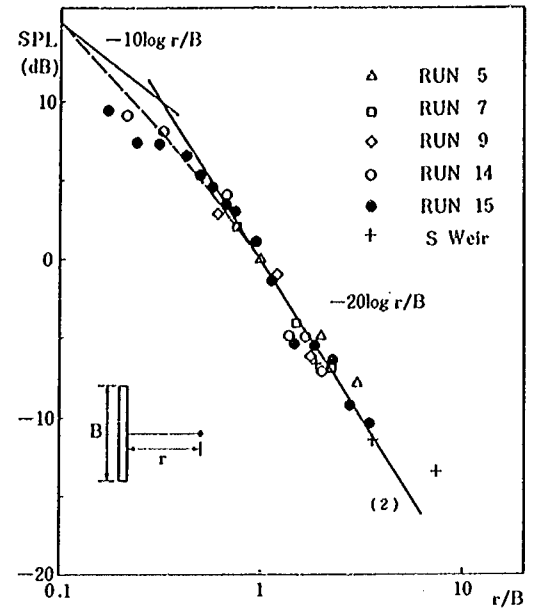
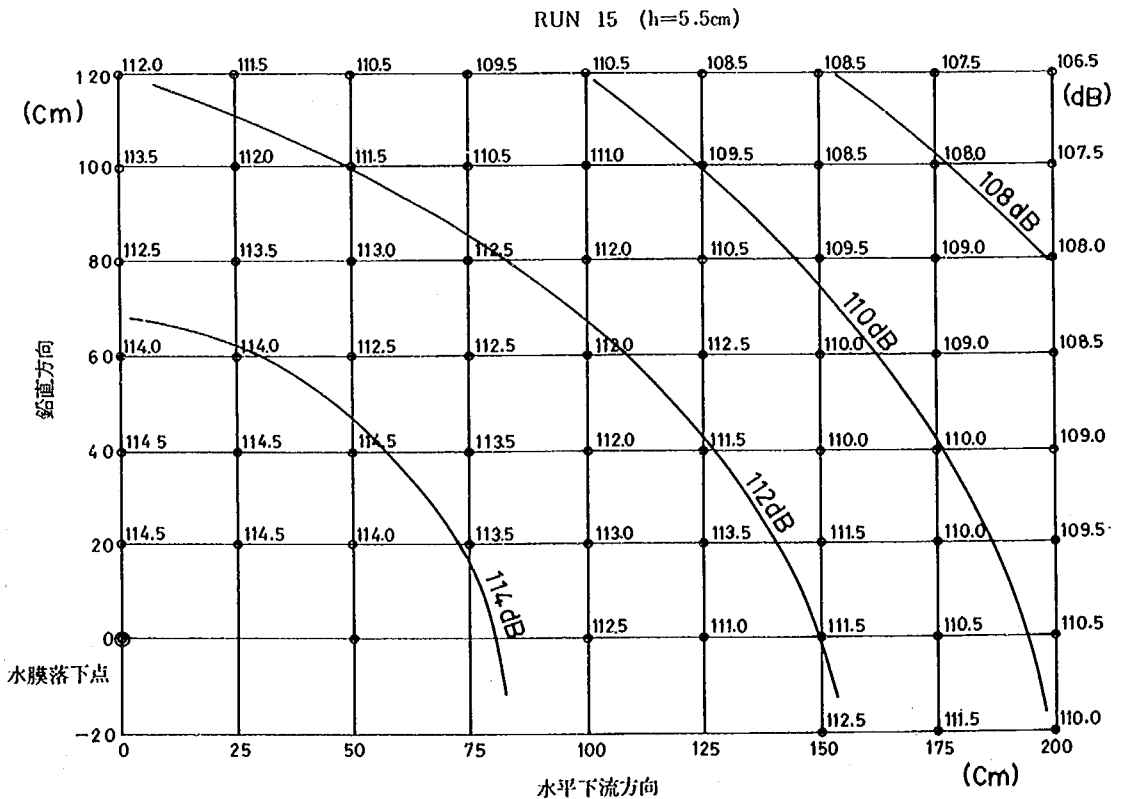


図-6.15 音圧レベル減衰特性

図-6.14 音圧レベル分布 RUN15 ($h=5.5$ cm)

7. 考 察

7.1 水膜振動の分類

上述の実験結果を整理して水膜振動の発生原因は以下のように分類される。

(1) 水膜固有値による振動 (水膜が薄い場合)

※水膜の慣性力が小さいため、僅かの外力で振動する。

※発生する音は、床叩き (水叩き) の音が主となる。

(2) 空洞との連成振動 (水膜が厚い場合)

※水膜の慣性力が大きく、空洞との連成が無いと振動として現れない。

※発生する音は、空洞内の音圧変動が水膜を透過してくるものが主となる。

7.2 鉛直落下水膜とフラップゲート越流水膜の相違

鉛直落下水膜モデルとフラップゲート越流水膜モデルの発生周波数を比較する場合は、鉛直落下の初速に相当するものが越流水がほぼ水平に放出されるフラップゲートでは定義することが困難であり、水膜の不安定性により議論することは難しい。ただし、鉛直落下モデルで初速が小さくなるに従って、フラップゲート越流水膜モデルの結果に漸近する傾向は認められる。

7.3 低周波空気振動による音圧レベルの推定

落下音による低周波音圧レベルは、越流水膜の落下により発生する音のエネルギーが越流水膜の落下エネルギーに比例すると考える。

$$W = \alpha \cdot U \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 W ；音のエネルギー、 U ；落下エネルギー、 α ；定数

落下エネルギーをポテンシャルエネルギーで表わすと次式になる。

$$U = m \cdot g \cdot H \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 m ；水の質量、 g ；重力加速度

ここで、質量は流量に相当し、堰あるいはゲートの越流公式により(6)式で示され(5)式は(7)式となる。

$$m = \rho \cdot C B h^{3/2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 ρ ；水の密度、 C ；流量係数、 B ；越流幅、 h ；越流水深

$$U = \rho g C B h^{3/2} H \quad \dots\dots\dots(7)$$

次に、落下水膜が振動して落下音以外に空気振動を発生する場合に、振動振幅に相当する係数 K を導入し

て落下エネルギーを補正すると(8)式となり、最終的に(4)式は(9)式となる。

$$U' = K \cdot U = K \cdot \rho g C B h^{3/2} H \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 U ；水膜振動を考慮した落下エネルギー

$$W = \alpha \cdot K \cdot U = \alpha \cdot K \cdot \rho g C B h^{3/2} H \\ = A \cdot K \cdot B h^{3/2} H \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 A ；定数 ($= \alpha \rho g C$)

これを、対数変換すると(10)式となる。

$$\text{PWL} = 10 \log (A K B h^{3/2} H) \\ = 10 \log A + 10 \log K + 10 \log B + 15 \log h \\ + 10 \log H \\ = \alpha_f + 10 \log B + 15 \log h + 10 \log H \quad \dots\dots(10)$$

ここに、 α_f ；定数項および振動振幅による補正項 ($= 10 \log A + 10 \log K$)

そこで、(10)式を用いて、各実験条件ごとに α_f を求めたものが図-7.1 である。図より、 α_f はスポイラーで水膜を分断したものも含めて、両端が開放された水膜は越流幅の対数項に関して線形である。一方、両端を密閉したものは、越流幅にかかわらず約 60 dB である。これより、 α_f は(11)式で近似されるものとする。

$$\alpha_f = 60 \quad (\text{両端密閉}) \\ = 9 + 18 \log B, \quad B \leq 6.0 \text{ m} \quad \dots\dots\dots(11) \\ (\text{片端または両端開放})$$

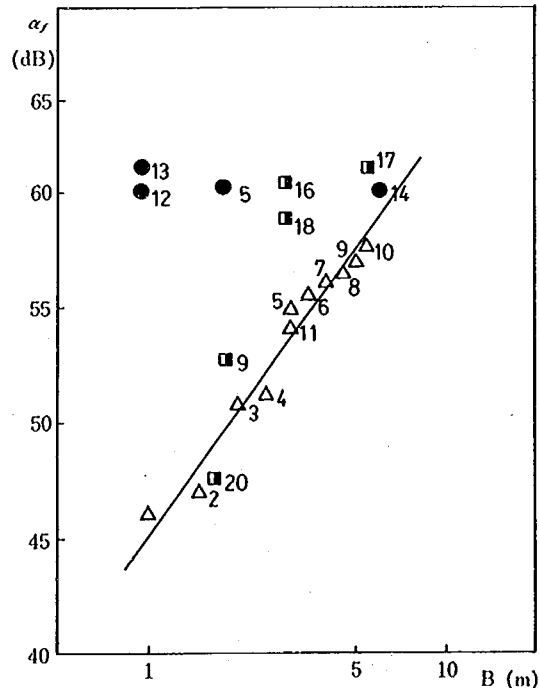


図-7.1 音圧レベル補正值

なお、 α_r の補正は水膜両端の縮流に関係し、水膜幅が6 m以上の場合には両端密閉の場合とほぼ同様になるものと考えられる。

従って、最終的な低周波音圧レベルの予測式は、距離減衰項も導入して(12)式で与えられる。

$$\text{SPL}(r) = 10 \log B' + 15 \log h_{\max} + 10 \log H - 20 \log r + 52$$

(両端密閉)

$$= 10 \log B' + 15 \log h_{\max} + 10 \log H - 20 \log r + 18 \log B + 1$$

($B \leq 6.0$ m かつ片端または両端開放)……(12)

ここに、 B ：越流幅 (cm)， B' ：1.5 B (両端密閉)，1.25 B (片端開放)， B (両端開放) (cm)， $h_{\max}$ ：最大音圧レベルを与える越流水深 (図-6.13) (cm)， H ：落下高 (cm)

7.4 振動防止対策

7.4.1 基本的な考え方

水膜振動に対する対策案としては以下のものが考えられる。

- ① 厚い水膜の場合 スポイラ等により水膜を分断し内圧変動を抑え振動を止める事が可能である。
- ② 薄い水膜の場合 落下高がある程度あると振動を止めるのは困難である。
 - ・ 薄い水膜での放流を生じないような操作ルールとする。
 - ・ 発生予想周波数と気柱振動、構造振動が一致するのを避ける。
 - ・ 落下高が大きく成らないよう中間位置で水膜を分断する。

7.4.2 水膜振動の三次元性と振動防止の考え方

図-7.2は三次元越流水膜モデルにおいて、越流水膜幅を1~6 mと変化させた場合に、単位幅あたりの水膜振動レベルに比例すると考えられる低周波空気振動の音響パワーレベルの変化を示したものである。振動は、落下高2.5 m，発生周波数約22 Hz，越流水深約4 cmの場合である。これによれば、3 mを境界に越流幅に対するレベルの傾向が異なり、特に幅が3 m以下になると急激にレベルが低下する。この原因としては、水膜端部の縮流の影響と水膜幅の音響的な効果が考えられ、発生周波数に対して、両端が開いていても空気圧変動が開放されない限界の距離が存在するのではないかと推察される。

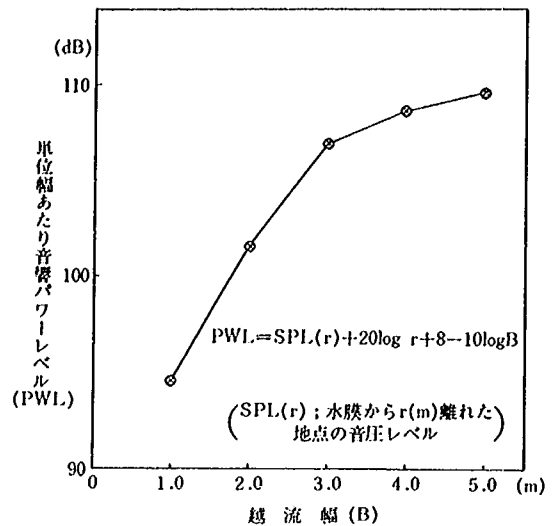


図-7.2 越流幅に対する水膜振動レベルの変化

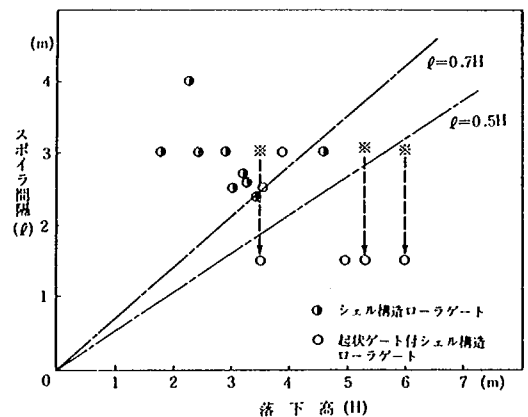


図-7.3 スポイラ間隔の実績

7.4.3 スポイラ設置の現状と問題点

従来より、発生防止対策として、図-2.1に示すようなゲート下流端に突起状の「スポイラ」を設置し一定間隔に水膜を分断する方法が採用されている。このスポイラは越流水膜を幾つかに分断して開口部を作り上下面の圧力バランスを維持するものである。ただし、スポイラは空洞に「給気をする」のではなく「圧力変動を開放する」ものであり、あまり設置間隔が長いと十分な効果が期待されない。

図-7.3に、径間30 m以上のシェル構造ローラゲートに設置されたスポイラ間隔の実績を示す。ここで落下高(H)とは、ゲート下流端から河床までの高さであ

る。

「土木技術者のための振動便覧(土木学会編)」には「スポイラは、落下高の0.5~0.7倍間隔に設置する。」と示されており、参考のために $l=0.5H$, $0.7H$ を図に点線で示している。実績によれば、落下高にかかわらず $l=2.5\sim 3.0$ mを採用したものが大半であるが、図に示す(*)は実機ゲートにおいて振動が生じたために $l=1.5$ mに改良したケースである。先述のスポイラ設計条件からすれば、 H が高くなれば l も長くて良いことになるが、実績の振動事例によればそうとは限らない。むしろ H にかかわらず、 $l\leq 2.0$ m程度とすれば問題となる振動は発生してはならず、また、図-7.2の実験結果で2 m程度から急激に振動レベルが低下することから、これを目安とすべきと考えられる。

また、 $l\geq 3.0$ mの事例で問題を生じていないものもあるが、越流操作の頻度の影響があるため、その点を考慮しておかなければならない。

8. 結 論

本研究では、鉛直落下水膜およびフラップゲート越流水膜を用いた二次元モデルおよび越流幅および水膜分断の効果を考慮した三次元モデルについて検討したが、明らかになった事項は次に示す通りである。

- 1) 水膜振動はゲート形状の影響をほとんど受けて、落下後の水膜固有の現象と考えられる。
- 2) 水膜はゲート振動を伴わなくても固有の周期で振動するが、ゲート扉体等の固有振動数が水膜振動の発生周波数の0.75~2.0倍の範囲にある場合には、水膜振動周波数がシフトする可能性がある。
- 3) 振動の発生周波数は二次元的と考えられ、落下高および水膜流速に関係している。対象とする水理構造物の落下高が明らかとなれば薄い水膜の発生周波数は概ね予測され、落下高1.5~3 mにおいて20 Hz~25 Hz程度と考えられる。
- 4) 越流幅、越流水深、水膜背後の空気室容量(通気の有無を含む)、落下点の水深などは、水膜振動の発生領域および振動レベルに影響を与えると考えられる。
- 5) 水膜振動の発生領域は長径間ほど広く、振動ピークを与える越流水深が増加する傾向がある。
- 6) 振動防止対策として水膜を分断する「スポイラ」は、それぞれの越流幅を狭くし、水膜振動を完全に停止させることはできなくても音圧レベルを低下させることは可能である。この場合には、ゲ-

ート使用範囲を考慮して、可能な限り2 m程度以下の水切り効果を確保することが望ましい。

7) 水膜振動による低周波音圧レベルは水膜両端の境界条件に影響され、壁に接する場合は音響影像により倍の水膜幅の場合と等価となる。従って、水膜の両端を根柱から離すことは、水膜背後の空気室を開放するのみならず音響的にも低減効果があると考えられる。

8) 水膜振動による低周波空気振動は水膜落下点における線音源と考えられる。また、水流のエネルギーに水膜振動による補正を行うことにより低周波空気振動のパワーレベルが推定され、これより各地点における低周波音レベルを算出することが可能と考えられる。

9. あとがき

実際にゲートが設置される現地においては自然風の影響により、薄い水膜は振動が励起される場合もあれば、逆に抑止されることも考えられる。従って、水膜振動の発生領域が影響を受ける可能性があることを考慮しておく必要がある。また、実機の二段式ローラゲートにおける振動のピークを与える越流水深は、本研究によるものよりやや大きい。これは落下高の相違とともに越流水深と実際の水膜厚との関係がゲート形状によって異なっているためと考えられる。

「スポイラ」は、現在においても水膜振動の防止対策として有力なものと考えられるが、その形状に関しては確実に音響的に空洞が開放されるものとしかつ提案する間隔を考慮しなければならない。また、新しい試みとして、水膜を膜状に流下させずに、放出点を鋸歯状や櫛状に加工して水膜を積極的に変形させて振動を防止する対策が検討され、実機ゲートにおいて効果が確認されているものもあり、設計段階における検討が必要である。

最後に、低周波音圧レベルの予測については、水膜振動が水流のエネルギーに比例する落下エネルギーと、主に越流幅に存在する非線形な水膜振動エネルギーが複雑に絡み合っているため、本実験で提案した予測式について、実機の計測データをもとにした検証が望まれる。

なお、本研究は河川総合開発事業調査費による研究課題「水流によるゲートおよび水脈の振動に関する調査」(昭和60~平成元)において実施したものである。

謝 辞

本研究の遂行に際し多大な御助言、御指導をいただいたダム水工研究室高須室長および中沢、野口主任研究員に感謝致します。また、実験および解析の遂行にあたり多大な労を提供していただいたダム水工研究室各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 西川秀利：砂防ダムの鳴音の研究，第25回土木学会年次学術講演会，1970年。
- 2) 中島，巻幡，砂田：越流ゲートの振動について，第22回土木学会年次学術講演会，1967年。
- 3) 本間，荻原：フラップゲートの自励振動について，第19回水理講演会論文集，1975年。
- 4) 本間，荻原：フラップゲートの振動についての理論解析，土木学会論文集，第233号，1975年。
- 5) 荻原国宏：フラップゲート及びナップの自励振動，土木学会論文集，第357号，1985年。
- 7) 門屋，坂井：ゲート越流の水脈振動に関する実験研究，川崎重工技報，82号，1983年。
- 8) 中沢，永松：フラップゲートの水理特性，土木技術資料，24-5，1982年。
- 9) 門屋，坂井：鉛直落下型モデルによる水脈振動実験，第41回土木学会年次学術講演会，1986年。
- 10) 荻原国宏：新体系土木工学，25，流体力，技報堂出版。
- 11) Taya, K., Ogawa, H. and Yamashita, M.: Noise Reduction of Water Fall, Journal of INCE of Japan, Vol. 6, No. 4, Aug. 1982.
- 12) 大久保，角：鉛直落下水膜の振動特性，第43回土木学会年次学術講演会，1988年。
- 13) 角，大久保：フラップゲート越流水膜の振動特性，第43回土木学会年次学術講演会，1988年。
- 14) 中島，角：三次元性を考慮した水膜振動特性，第44回土木学会年次学術講演会，1989年。
- 15) 角，中島：水膜振動の三次元特性と音圧レベルの推定に関する研究，土木学会水工学論文集，1990年。
- 16) Kolkman, P. A.: Instability of a Vertical Water-Curtain Closing an Air-Chamber, Flow-Induced Structural Vibrations, IUTAM/IAHR Symposium (Karlsruhe), 1972.
- 17) Triber, B.: Theoretical Study of Nappe Oscillation, Flow-Induced Structural Vibration 17-33, IUTAM/IAHR Symposium (Karlsruhe), 1972.
- 18) Schwartz, H. I.: Edgetones and Nappe Oscillation, Jour. of the Acoustic Society of America, Vol. 3, 1966.
- 19) Naudascher, E.: Discussion on Nappe Oscillation by H. Ivan Schwartz, Proc. of ASCE, HY3, 1965.
- 20) Petricat, K.: Vibration Tests on Weirs and Bottom Gates, Water Power, February and March, 1958.
- 21) Unny, T. E. and Petricat, K.: Experience with Flow-Induced Vibrations, Proc. of ASCE, HY2, 1966.
- 22) Schwartz, H. I.: Nappe Oscillation, Proc. of ASCE, HY6, 1964.
- 23) Petricat, K. and Unny, T. E.: Discussion on Nappe Oscillation by H. Ivan Schwartz, Proc. of ASCE, HY5, 1965.
- 24) Schwartz, H. I.: Projected Nappe Subject to Harmonic Pressure, Proc. Inst. of Civ. Engrs., London, July 1964.
- 25) 竹林，野口，増本：堰越流放流時に発生する低周波空気振動に関する一考察，ダム技術，Vol. 4-4，1986。
- 26) Rockwell, D.: Induced Oscillation of Liquid Jet-Gas Cavity System, Proc. of ASCE, HY3, 1977.
- 27) Binnie, A. M.: Resonating Water Falls, Proc. R. Soc. of London A. 339, 1974.
- 28) Binnie, A. M.: The Stability of a Falling Sheet of Water, Proc. R. Soc. of London A. 326, 1972.
- 29) Hagerty, W. W. and Shea, J. F.: A Study of the Stability of Plane Fluid Sheets, Jour. of Applied Mechanics, ASME, Dec. 1955.
- 30) Knisely, C. W.: Helmholtz Resonator Model of Nappe Oscillation, Proc. of 6th APD-IAHR Symposium (Kyoto), 1988.
- 31) 杉山，奥平，早川：堰堤から発生する低周波空気振動と対策事例，公害と対策，Vol. 15, No. 9。
- 32) 梅景，平田，矢島，水山：砂防ダムからの落下水による異常音発生とその処理，新砂防 122, 1978年。
- 33) 土木技術者のための振動便覧：土木学会編。

平成2年9月3日原稿受理

茨城県、五浦海岸（岩石海岸）の 地形学的特徴と侵食実態

土木研究所報告
第185号-1 1991年3月

宇多高明, 山本幸次

要 旨

海食崖の侵食状況調査手法を取りまとめ、茨城県の五浦海岸の海食崖の侵食調査に応用した。地質的に見ると、五浦海岸の地層は砂岩・泥質砂岩層、凝灰岩・泥岩互層、石灰岩層に大別され、これらの地層の分布状況に応じ、当海岸の海食洞は6パターンに分類された。砂岩・泥質砂岩層や凝灰岩・泥岩互層の場合は侵食が著しく、かなり厚い石灰岩層は海食洞の形成範囲を制約する効果を持つ。1980年～1985年の期間で海食崖の後退速度を求めると、最大値は1.4m/yr、平均値は1.1m/yrであった。五浦海岸の北部、南部、東部の海食崖は、波向出現率、地層分布、海食洞の分布および海食崖の後退速度等より特性分類が可能である。南部の海岸では、凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が海面付近に分布し、波浪の入射頻度も高いため海食崖の崩壊が生じ、海食崖の後退速度も大きい。一方、東部の海岸では波浪の入射頻度が高く、また海面付近に石灰岩層が多く分布しているため海食洞や波食窪などの海食地形が形成され易い。しかし、海食崖の後退速度は大きくない。また北部の海岸では、凝灰岩・泥岩互層や砂岩・泥質砂岩層が海面付近に分布しているものの、北からの波浪の入射頻度が低いため海食崖自体の崩壊速度は比較的遅い。海食崖の後退を決定する要因としては、波浪条件のみならず岩質や地層の分布が重要であることが指摘される。

キーワード：岩石海岸、海食崖、海食洞、地層分布、海食崖の後退速度

越流式ゲートの越流水膜振動特性

土木研究所報告
第185号-2 1991年3月

角 哲也, 大久保精二, 中島康夫

要 旨

河川の堰やダムの越流式ゲートおよび砂防ダム等において、越流水膜が振動を生じ、これに伴い低周波空気振動が発生することがある。この越流水膜振動は、これら河川構造物の安定性上問題を生じるのみならず、周辺環境に与える影響が大きく、適切な防止対策が不可欠である。

本研究では、水膜を励起する振動発生機構を明らかにするとともに、振動防止対策および低周波空気振動による低周波音レベルの推定式について考察する。検討は、振動発生に複雑に関係する要素を分離するために、鉛直落下水膜モデル、フラップゲート越流水膜モデルおよび越流幅を可変とした三次元越流水膜モデルを用いて水理模型実験により実施している。得られた主要な結論は次のとおりである。

- 1) 水膜振動はゲート形状の影響をほとんど受けず、落下後の水膜固有の現象と考えられる。
- 2) 水膜はゲート振動を伴わなくても固有の周期で振動するが、ゲート扉体等の固有周波数が水膜振動の発生周波数の0.75～2.0倍の範囲にある場合には、水膜振動周波数がシフトする可能性がある。
- 3) 水膜振動の発生周波数は、落下高および水膜流速に関係していると考えられる。
- 4) 越流幅、越流水深、水膜背後の空洞容積（給気の有無を含む）、落下点の水深などは、水膜振動の発生領域および振動レベルに影響を与えると考えられる。
- 5) 水膜振動の発生領域は長径間ほど広く、振動ピークを与える越流水深が増加する傾向がある。
- 6) 振動防止対策として水膜を分断する「スボイラ」を設置する場合には、ゲート使用範囲を考慮して、可能な限り2 m程度以下の水切り効果を確保することが望ましい。
- 7) 水膜振動による低周波音圧レベルは水膜両端の境界条件に影響され、水膜の両端を堰柱から離すことは、水膜背後の空洞を開放するのみならず音響的にも低減効果があると考えられる。
- 8) 水膜振動による低周波空気振動は水膜落下点における線音源と考えられ、また、水流のエネルギーに水膜振動による補正を行うことにより低周波音圧レベルの推定を行うことが可能である。

キーワード：越流式ゲート、フラップゲート、低周波空気振動、水膜振動、スボイラ、砂防ダム

Geomorphological features and erosion of
sea cliff on the Izura Rocky Coast
in Ibaraki Prefecture

Report of PWRI
Vol. 185-1 Mar. 1991

by Takaaki UDA,
Koji YAMAMOTO

Synopsis

Methodology for the investigation of sea cliff erosion is summarized, and it is applied to the study on the cliff erosion on the Izura Coast in Ibaraki Prefecture. In a geological sense the stratum on this coast is classified into three types composed of (1) sandstone and pelitic sandstone, (2) alternation of strata of tuff and mudstone, and (3) limestone. The shape of the sea cave on the Izura Coast is classified into six patterns depending on the distribution of these strata. In the cases in which the stratum is composed of sandstone and pelitic sandstone or the alternation of strata of tuff and mudstone cliff erosion is severe, whereas considerably thick stratum of limestone confines the formation zone of sea cave. In a period between 1980 and 1985 retreat rate of sea cliff was 1.4 m/yr at maximum and 1.1 m/yr on an average. The sea cliff erosion of the Izura Coast can be classified into three categories depending on the probability of occurrence of wave direction, distributions of stratum and sea cave, and retreat rate of sea cliff. On the southern part of the coast sea cliff can be easily eroded and its retreat rate is large, because the alternation of tuff and mudstone or sandstone and pelitic sandstone exists in the vicinity of the sea surface, and the probability of wave incidence from the south is large. On the eastern part of the coast sea cave and notch are liable to be formed because limestone exists near the sea surface. However, the retreat rate of sea cliff is not large. On the northern part of the coast retreat rate of sea cliff is not large because of the low probability of occurrence of wave incidence, although the same strata can be observed as is the case on the south part of the coast. Consequently it is concluded that not only the wave characteristics but also rock features and distribution of strata are important factors determining sea cliff erosion.

Key Words : Sea cliff, Rocky coast, Sea cave, Erosion, Stratum, Retreat rate of sea cliff.

Characteristics of Nappe Oscillations
on Overflow Gates

Report of PWRI
Vol. 185-2 Mar. 1991

by Tetsuya SUMI,
Seiji OKUBO,
Yasuo NAKAJIMA

Synopsis

On overflow gates installed on river weirs or dams and sometimes on Sabo dams, intensive nappe oscillations which cause gate vibrations and low frequency air vibrations are occurring in a specific overflow depth. Since this nappe oscillation may make structures unstable and also has serious environmental effect by low frequency air vibrations, it is indispensable to devise effective countermeasures to restrain the oscillation.

This study focuses on an oscillation mechanism which excites the nappe and investigates countermeasures as well as measures to estimate Sound Pressure Levels by low frequency air vibrations. In order to separate factors complicatedly concerned with the oscillation, we conducted the three different hydraulic models, i. e. vertically falling nappe model, flap-gate overflow nappe model and three-dimensional overflow nappe model changeable in weir width. Main conclusions are followings:

- 1) The nappe oscillates naturally, since configuration of a gate-leaf surface has rarely influence on the oscillation.
- 2) Nappe may cause the oscillation under its natural frequency without a gate vibration and the frequency can be shifted in case that a gate leaf has a natural frequency within 0.75~2.0 times the nappe natural frequency.
- 3) Nappe oscillation frequency are closely concerned with fall heights and water fall velocities.
- 4) Weir width, overflow depth, volume of an air cavity behind the nappe (including existence of an air vent), downstream depth at a falling point influence the oscillation range and peak levels.
- 5) On long-span gates, oscillation range is getting wider and an overflow depth which generates the maximum oscillation level also increase.
- 6) 'Spoilers' are desirable to be installed within about 2 m spaces to make sure its nappe splitting effect.
- 7) Since sound pressure levels are influenced by the boundary conditions of both ends of nappe, detaching the nappe from side piers is effective both for releasing air pressure in a cavity and diminishing sound pressure levels.
- 8) Low frequency air vibration generated by the nappe oscillation forms a line sound source at a falling point and its sound pressure levels can be estimated by water potential energy corrected by nappe oscillation coefficient.

Key Words : Overflow gate, Flap-gate, Low frequency air vibration, Nappe oscillation, Spoiler, Sabo dam

土木研究所報告第185号

平成3年3月25日発行

発行 建設省土木研究所
〒305 茨城県つくば市大字旭1番地
電話 0298 (64) 2211

印刷 株式会社明文社
〒103 東京都中央区日本橋蛸殻町1-24-8
電話 03 (3668) 6601

本研究報告より転載又は複製する場合は、前もって建設省土木研究所企画部情報資料課に連絡のうえ、許可を得てください。

Report
of
Public Works Research Institute
Ministry of Construction
Vol. 185, March 1991

CONTENTS

Geomorphological features and erosion of sea cliff on the Izura Rocky Coast in Ibaraki Prefecture	Takaaki UDA	1
	Koji YAMAMOTO	
Characteristics of Nappe Oscillations on Overflow Gates	Tetsuya SUMI	17
	Seiji OKUBO	
	Yasuo NAKAJIMA	
