九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

空気防波堤の研究に就いてII ： 伊王島に於ける現地実験

応用力学研究所水文学研究委員会

https://doi.org/10.15017/4743354

出版情報：應用力學研究所所報. 7, pp.1-25, 1955-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

空気防波堤の研究に就いて II.

伊王島に於ける現地実験[1)]

応用力学研究所水文学研究委員会

概　　要

長崎県土木部港湾課の協力のもとに，昭和 30 年冬期季節風の期間に，長崎港伊王島日鉄礦業所岸壁沖に於て空気防波堤の実物実験を行つた．使用可能な空気量は 30 立方米毎分であつたので，消波目標の波長を 15 米として，空気防波堤（多孔管）の長さを 30 米，深度を 8 米 とした．

総ての準備工事及び測定器具の設置，検定の終つた 2 月 14 日以降に於て，海面の波立つ機会に実験は行われた．又凪の日に，水平流の流速分布及び流速と空気量との関係が測定された．この報告では，以上の実験の計画及び実施過程の概要と，得られた結果の整理及びその検討が示されている．主なる結果は次の通りである：流速分布は実験室にて求められたものと同型であり，相似律が成立つている．流速と空気量の関係には，海水の単位容積毎の気泡容積が，これが小さいときには，重要な意味をもつことが発見された．消波実験の結果の整理は未だ終つていないが，2 つの例に就いてスペクトル解析が行われた．消波の模様はスペクトルの比較に依つてよく知ることが出来る．2 つの例に就いて，消波対象の波長と所要動力の関係は理論値によく一致している．この意味から今回の実験は成功したものと言えるであろう．

消波実験及び水平流速の測定結果から，消波には渦動粘性が大きな役割をもつていることが知られる．

多孔管が短かつたゝめ，その両端からの廻折波が著しく，見かけ上空気防波堤の性能を低下さしていた．

I　緒　　言

1． 空気防波堤の消波作用は上昇流が水表面に到達し方向を変えて生ずる水平流及びそれに伴う渦動粘性によるものである．この様な見解のもとに，i）気泡を無数に含有する上昇噴流の研究，ii）上昇水流が水表面に至つて移り変る水平噴流の研究，iii）水平流及び渦動粘性が正弦波に及ぼす消波作用の研究が理論的及び実験的になされ，その主な結果は昭和

---

1) この現地実験は長崎県土木部港湾課の協力のもとに行われた．一式の準備工事及び臨時施設の維持など経費もともに総て港湾課が担当し，実験，測定及び整理は水文学研究委員会が担当した（現地に於ける実験測定は主として粟谷陽一，富岡勝に依つて行われた）．この稿に就いての問い合せは粟原道徳宛にされたし．

29年8月応用力学研究所所報[1]に発表され，秋には海岸工学研究発表会（神戸）に於て発表された.[2]

空気防波堤実用化のためには，吾々は更に，iv）スペクトルを考慮に入れて，波浪に対する総合的効果を研究する他に，v）施設せんとする港に於ける波浪の観測法，最後に，vi）総合的実地実験及び施工法の研究が必要である．特に，消波機能は対象とする波の波長に著しく影響されるばかりでなく，気泡群の上昇による水流は気泡放出管（以下多孔管と呼ぶことにする）の深度に著しい影響を受けると考えられるので，ii），iii）に属する寸法効果の研究には慎重でなければならない．ここに vi）の重要性がある．今回伊王島に於て実地実験を行うことが出来たことは誠に意義深いことである．

茲に今回の実地実験に就いて，その計画，実施過程及び得られた結果の概要を報告することは，研究の新らしい段階の基礎となるばかりでなく，実施を希望している技術者に対して重要な意義を有するであろう．

2．伊王島に於ける実験の目的　空気防波堤が実用に供されるためには実地試験，或はそれに相当する試みを行い，計画の当否が見定められなければならぬ．而も空気防波堤は永い歴史をもちながら未だに確立されていないことから，その組織的な実地実験が望ましいのである．

吾々の空気防波堤に関する知識は，理論的考察及び小型の模型に就いて行われた実験的研究から得られたものであり，それ等の結果が果して実物大の空気防波堤に就いても成立つであろうか．具体的に言うならば：Ⅰ）多孔管の深さが著しく違うため，a）気体の圧縮性が現われる．また多量の空気を放出さすために気泡が大きくなる．これ等のことと，b）海水中に含まれる気泡の割合が著しく変ること等が，bubble jet の性能に如何に影響するであろうか．又論文Ⅰに於て誘導した所要動力公式にどう影響するであろうか．Ⅱ）波長が著しく長くなること及び実際の波は実験室や単純な理論で考えている様な正弦波の様なものでなく複雑である．この様な事が波長と所要動力の関係を如何に左右するであろうか．Ⅲ）消波機構の主因は水平流であろうか，或は渦動粘性であろうか．空気防波堤の性能から総括的に言うならば，多孔管の深度が深くなり，対象波長が大きくなつた場合に，波長に対する消波所要動力が何うなるかを知ること，即ち論文Ⅰ第9図に於て信頼のおけない外国の実例点の代りに波の性質も充分考慮された組織的な信頼度の高い測定による幾つかの点が是非欲しいのである．

扨て実地試験に際しての第一の危惧は，実験室に於ける様に本当に波は消えるであろうか，即ちⅡ）の問題に関連して起る．今回の実地試験は本邦に於ける空気防波堤実施の最

---

1) 応用力学研究所々報第5号（29年8月）．以下この論文を（Ⅰ）と記号する．

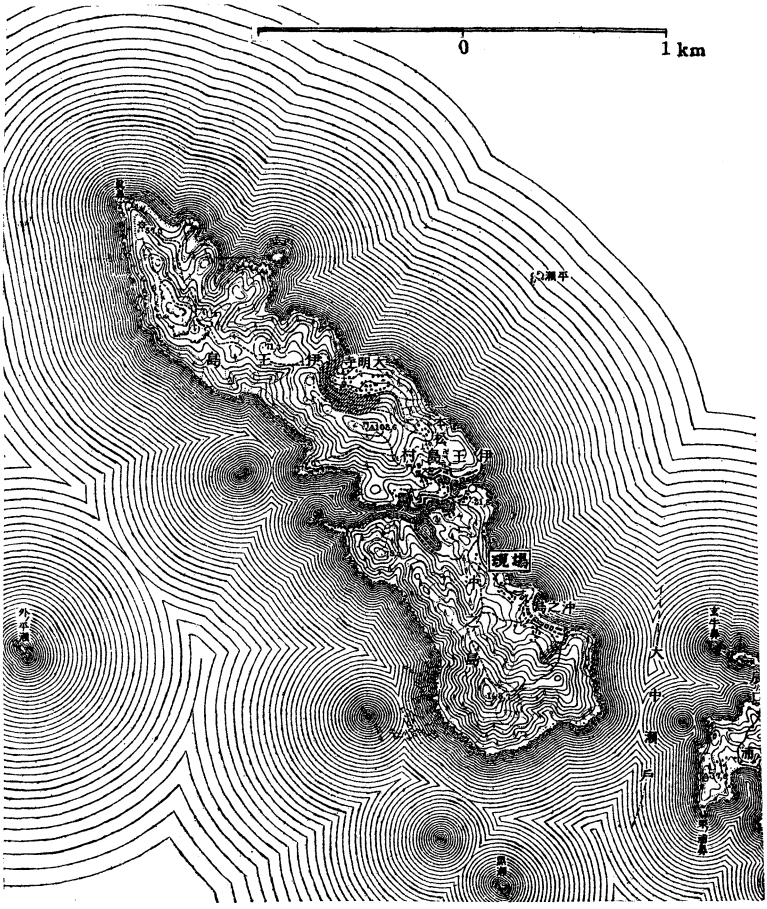
2) 海岸工学研究発表会論文集（土木学会関西支部）昭和29年11月．

初の試みであり，而も消波機構及び性能を組織的に探る意味に於て世界最初のものである．従つて現場に於て使用可能な空気量に依つて安全に消波が出来，而も初期の目的に沿つた測定が確実に行えることを第一条件として，比較的波長の短い伊王島日鉄鑛業所石炭積込の岸壁が選ばれた．

実際の空気防波堤に就いて，その性能を検討することがこの実験の第一義的な目的であるが，必然的に，水中へ空気が噴出する場合の流出係数，多孔管の腐蝕，多孔管設置等海中部分の施工等実際面の多くの問題が附随する．更に実験室に於けると甚だしく異つた状態にあるため，実験室では見出し得なかつた新らしい事実の発見も期待される．

II　伊王島に於ける試験計画及び実施の概要

3．伊王島は長崎市より西南 10 粁長崎港外にあつて，北西に位置する長さ 3.5 粁，幅約

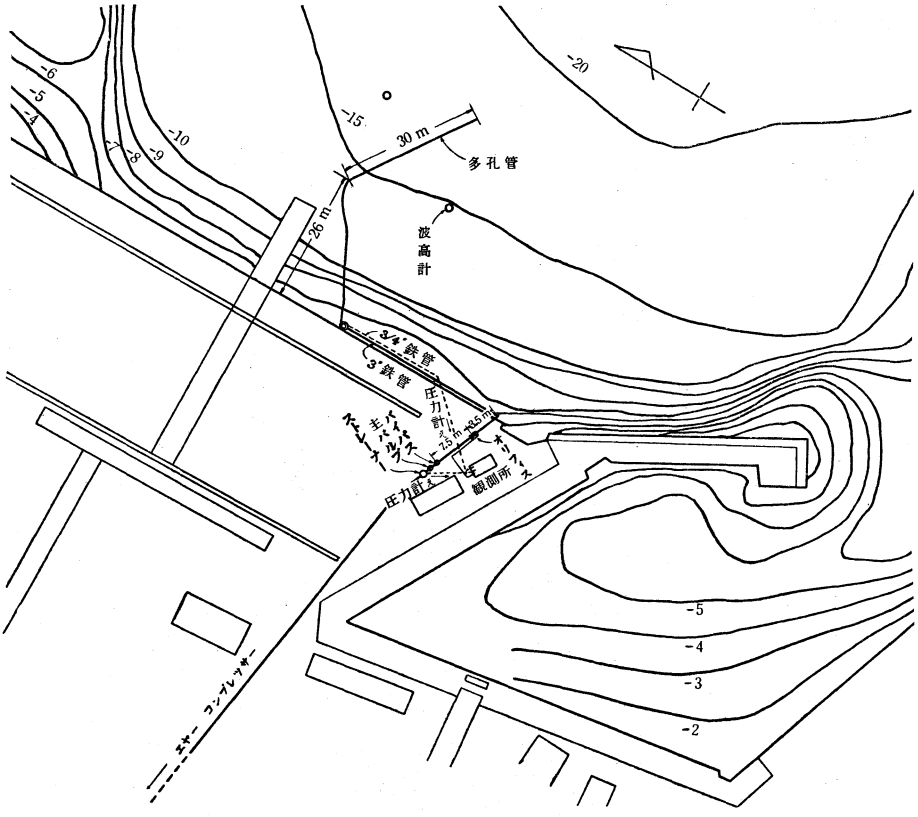


第 1 図　伊　王　島

600米の小島である．香焼島と共に長崎湾に続く入り海を形成している．その対岸距離は，東に2～3粁，北東に約6粁，北から北西に開けて 10～20粁である．

冬期の季節風には，強風の際に東北より来る週期 3秒程度の波，北西風による長週期の廻折波が予期される．附近の海は深く，深度は岸壁に沿つて既に 6～7米にして，少しく離れるとたちどころに 10米を越える．圧縮空気も毎分 30立方米まで使用の許可を得た．従つて吾々の目的には相応しい場所と言える．

実験の対象となる波の波長を 15米（平均周期 3.1秒）以内と想定すると，多孔管の深度は 8米程度で充分である.[1]　上昇流及び水平流が 2次元的に流れるためには，多孔管の長さはその深さ及び波長に較べて充分長いことが必要である．他方単位長さの空気量を 1立方米毎分以下にすることは実験を無意味にする危険があるので，管長を波長の 2倍，即ち 30米と定めた．



第 2 図　伊 王 島 岸 壁 附 近

---

1)　現在多孔管深度は波長の ½～⅔ と考えている．この事に就いては続く研究報告に於て論ぜられるであろう．

気象統計に従つて冬期最も頻度の多い強風に対応する波に対して多孔管を設置した．送気管の途中には流量調節弁，圧力計，流量計が取り付けられる．その様子は第2図に示されている．

多孔管の前後に抵抗型波高計を設置し，これを陸上の自記電流計に連絡して，進入してくる原波と消波作用を受けて出て行く減衰波の波型の同時記録をとることとした．空気防波堤の性能試験は，荒天に際し多孔管に波が都合よく向う場合に行う．即ち消費空気量を数段に変化させ各空気量に就いて多孔管前後の波型記録をとり，後日にこれ等を調和解析し，得られるスペクトルを比較検討して空気防波堤の性能を検べることとしたが，実際には波高計に故障を生じ多孔管の後方にある1本だけを使用することとなつた．従つて同時記録は得られず，空気を放出する前後に於ける記録を以つて代用した．

空気防波堤の物理的機構を探り，その特性を一そう窮め，その改良を可能とするために，以上の消波特性の直接的な測定ばかりでなく，風の日に bubble jet による水平流の流速分布及び消費空気量と流速の関係の測定がプログラムに付け加えられた．
各測定実験に際して，風向，風速及び潮位の記録されることは勿論であるが，予め潮流の測定は充分行われる様に計画された．

4．多孔管の設計及びその設置　空気防波堤の設計に際しては，先ず消波対象の波に対する単位長さ毎の空気量及び多孔管の深度の決定に次いで，多孔管の直径及び気孔の直径及び数の決定が重要なことである．

多孔管の腐蝕のことは期間が短いので度外視し，3 吋の鉄管を使用することとした．然るときは流量 30 立方米毎分の場合に，30 米管内の最大の圧力差は 0.33 米（水柱）に過ぎない．従つて気孔による圧力損失を 10 米とすれば，[1] 流出空気の配分は平等であるとみて差支えない．即ち単位長さ毎の気孔の数は一様にして差支えない．

多孔管の深度が一様でない場合，即ち水平に設置する際の誤差が大きいと空気の流出が不平等になる．若し最小の流量を最大のときの 1/2.5 に仮定し，その際に 10％ の流出量の不平等を許すならば，深度の誤差は 20 糎まで許すことが出来る．[2] この様な条件のもとに気孔数を計算すると，その直径を 1.5 粍として1米毎に 35.7 箇を得る．但しその際に縮流係数は 0.60 と仮定してある．[3]

過去 1 ケ年間の気象記録より冬期の最多風向を北東と推定して多孔管を設置することとした．実際には北北西の強風多く，測定に相応しい波浪はこの風による波が廻折して北北東より来るものが多かつたので，後に多孔管の向を変更した．

---

1), 2) 実際の空気防波堤では空気圧縮機の工率を減らすために出来るだけこの損失を小さくする必要がある．

3) 第 14 節に述べられている様に，これは流量の函数であることが実地試験の資料から知られた．

岸壁よりの反射波を避けるために成る可く沖合に多孔管を敷設すべきであるが，海底が急に深くなるため，作業の困難を軽減するため第2図に示された様に敷設した．そのため波型記録に反射波が入り，更に予期しなかつた多孔管の両端よりの廻折波と共に見かけ上空気防波堤の性能を著しく低下させる結果を生じた．

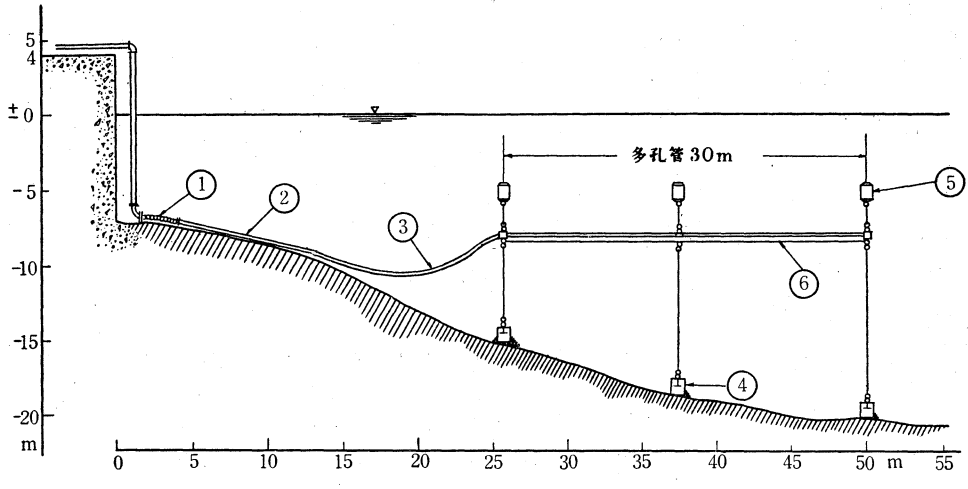
多孔管を所定の位置に，所定の深さを保ち固定する最も簡単な方法として，先ず多孔管を筏に乗せて安定させ，これをブイ及びコンクリート方塊を用い海水中に宙吊りする方法を選んだ．これには試験期間中に深度を調節する計画が含まれていたのである．多孔管と送気管との連絡には適当にゴムホースを用い，施工を容易ならしめた．その様子は第3図に示されいる．

昭和29年11月より実験準備工事は着手され，30年1月中には地上部を略々完成し，つづいて海中部分も完成，2月4日に両者の連絡を終つて，本邦に於ける最初の空気防波堤に空気は送り込まれた．

この際には記録はとられていないが，空気消費量は50立方米/分と推定される．又北北西の強風による劇しい波浪は美事に崩壊された．

その後多孔管敷設の不備を調整すると同時に波高計を設置し，検定を終え，2月14日に総ての準備工作は完成した．但しこの間に波高計の一箇は破損し，唯1箇を多孔管の後方に設置し送気の前後に於ける記録をとることとなつた．

準備完了後は，海面の波立つ，あらゆる機会に実験は行われ，幾つかの有効な資料が得られた．



第 3 図　海 底 配 管 図

1．サクションホース　2．3 吋 鉄 管　3．ゴムホース
4．アンカー用方塊　5．ドラム罐　6．筏

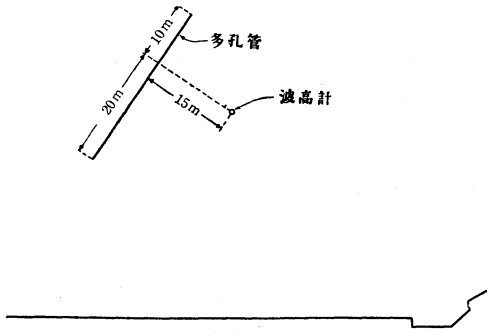
III 測定及び測定装置

5. 測定及び観察事項概要　今回行われた実験事項は概ね次の通りである.

i）**消波試験**　消波試験を行う場合，先ず予備として，其時の岸壁に於ける風向風速及び潮位を測定した. 空気防波堤を動作させぬ場合の波形を空気防波堤後方に設けられた波高計に依り記録し，同時に波面の方向，波の性質（即ちきれいな進行波であるか，波面のはつきりせぬ波であるか等）岸壁に於ける反射状態等を観察した. 次に防波堤に空気を送り，空気量を適宜調節して，その場合の波形を記録に取り，同時に消波状況，空気防波堤の両端に於ける波の廻折状況及び波高計に対する廻折波の状況，岸壁よりの反射波の状況，及び波高計の状態（位置の移動，傾斜等）を観察した. 空気量は，送気管途中に設けられたオリフイス流量計により生じた圧力差を水銀圧力計で測り，又多孔管内の空気の圧力を圧力計で測定し，之等より算出する. 種々の空気量に対する消波実験を行つた後，送気管を閉じて空気防波堤の影響が無くなるまで待ち，再び其の時の波型を記録し，実験中の波の変化をしらべる.

ii）**水平流の測定**　凪の日の最満潮時又は最干潮時を選び，気泡噴流の上昇によつて誘起される水平流の流速を測定した. 即ち一定の空気量を多孔管に送り，多孔管中央より後方に張られた綱で小舟を固定し，之よりプライズ型流速計を吊して各点の流速を測定し，或は測定位置を固定して種々の空気量に対する流速を同要領で測り，流速分布及び流速の空気量依存性を測定した. 又，概略同様の方法で，空気防波堤は作用させず，潮流の流速測定も行つた.

6. 消波状況の測定　空気防波堤の消波作用を測定するには，最も良く消波されると考えられる点に於ける波形と，その点に於ける消波を行つていない場合の波形とを比較する方法を用いた. 波高計の位置は，最も頻繁に起る波の向き，及び岸壁からの反射波を考慮して，第4図の如く定めた. 此の位置で消波作用が好都合に記録されているか否かは，勿論その都度観察されねばならない.



第 4 図　波高計の位置

波高計設置の場所撰定は非常に困難であつた. 尚最初の計画では，多孔管の両側に波高計を設けて常に両方の波型の記録を比較する予定であつたが，波高計の故障等の為め出来なかつた. 前記の消波測定の方法は実験中波の変化する場合に

稍々支障がある.

波形記録の原理は，フルード型波高計のポールに電気抵抗線を2本ポールに平行に張り，抵抗線の上端の端子間の電気抵抗の変化を記録電流計に記録させるものである．即ち端子間抵抗は，波高計に対する海水面の位置と直線的な関係になる様にしてあるので之に一定の交流電流を通じたときに生ずる電圧に比例して記録電流計に電流を流してやれば，直ちに波形の記録が得られる.

7. 波形記録装置　電気抵抗線を波浪中に直立固定する方法としては，前述の通りフルード型波高計を用いた．波高計のポールに腕をつけて置き，之に抵抗線を張つた枠を取付ける．枠には，抵抗線（市販の 60 W 用鉄クローム線）を両端絶縁して2本平行に張り，各抵抗線の両端には被覆導線を接続してある．導線はポール上端まで引き，両抵抗線の上端に接続したものは，陸上の測定室に至る二芯キャップタイヤーコードに接続し，下端より来たものは，ラヂオ用 50 オーム可変抵抗で短絡する.

フルード型波高計の設置に当り特に注意を要するのは，ポールの位置の移動を極力減らす様，鋼索の長さを調節する事である.

フルード型波高計を用いたのは，波形の記録を取る場合に潮汐等の長週期の海面の上下に感ぜず，従つて波浪に対する感度を高く取る事が出来るからである．然し気泡に依つて生ずる水平流に依つてポールが押し流され，鋼索が緊張してポールは斜になつて沈み，更に長波長の波に依つて振動し，波形記録を著しく歪ませる場合があつた．そこで3月22日以降多孔管の反対側に竹を立て，之に吹流し状のものをつけて波高計のポールと針金で連結し，安定さすことが出来たが季節風が去つて遂に消波実験には間に合わなかつた.

次に波形記録装置の動作に就いて説明する．二本の電気抵抗線を平行に接近させて垂直に海水面に立て，その下部を海中に浸した場合を考える．両抵抗線は共に全長を L，空中に露出している部分の長さを l とする.

今仮に海水が完全な導体であるとすれば，両抵抗線の上端の端子間の抵抗は $2\rho l$ である．茲に ρ は抵抗線の単位長さ当りの抵抗である．そこでこの抵抗値は海水面の高さと直線的な関係にある．即ち抵抗値の時間的変化は直ちに波形を示す事となる．然し実際には海水は完全な導体ではないので，両抵抗線の上端の端子間抵抗 R は $2\rho l$ より大きくなり，且つ直線性が保たれない.

そこで両抵抗線の下端を R_0 なる抵抗で短絡すると，端子間抵抗は

$$R = 2\rho l + \sqrt{\frac{2\rho}{g}}\,\frac{\left(\sqrt{\frac{2\rho}{g}} + R_0\right)e^{2\sqrt{2\rho g}(L-l)} - \left(\sqrt{\frac{2\rho}{g}} - R_0\right)}{\left(\sqrt{\frac{2\rho}{g}} + R_0\right)e^{2\sqrt{2\rho g}(L-l)} + \left(\sqrt{\frac{2\rho}{g}} - R_0\right)}, \cdots\cdots (1)$$

となる．玆に g は抵抗線の単位長さ相互間の海水による電気伝導度である．
R が l と直接的な関係にあるためには

$$R_0 = \sqrt{2\rho/g} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

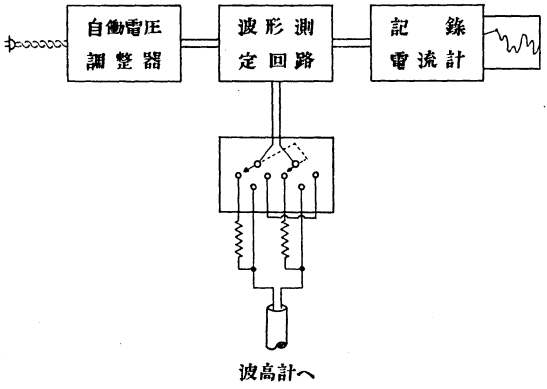
とすればよく，そのとき

$$R = 2\rho l + \sqrt{2\rho/g}$$

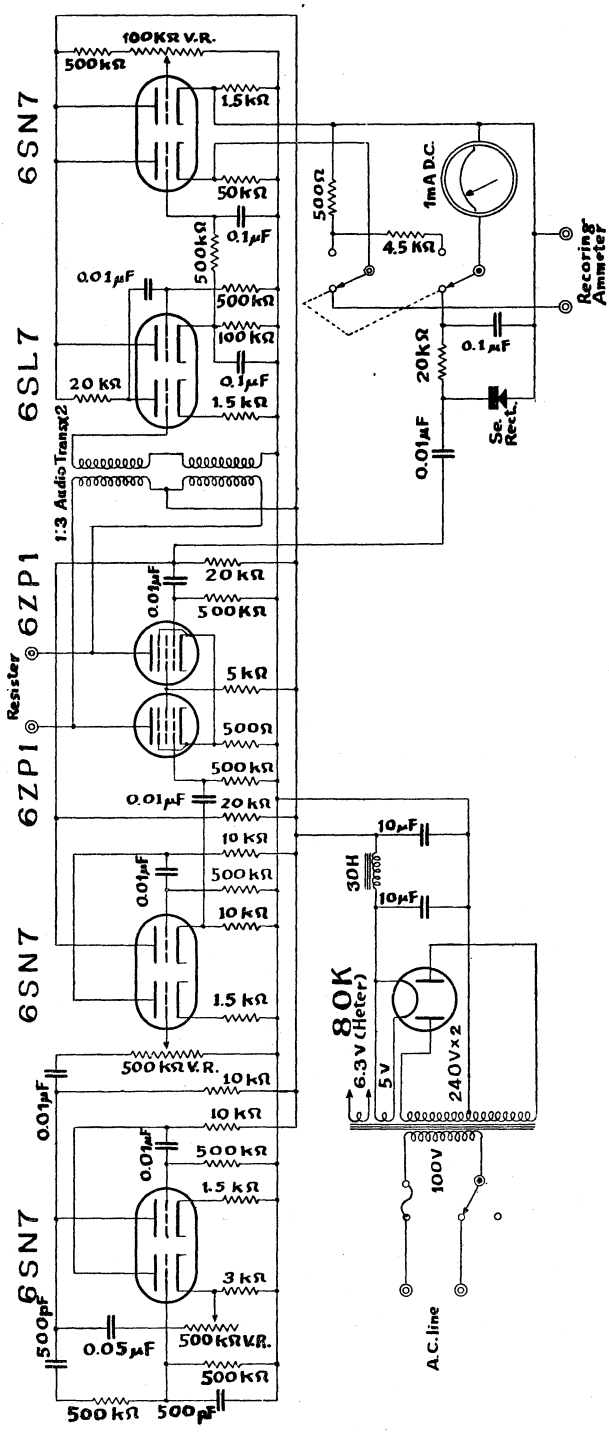
となる．$R_0 < \sqrt{2\rho/g}$ のときには $L-l$ の小さいときに R の変化は減少し，又 $R_0 > \sqrt{2\rho/g}$ のときには $L-l$ の小さいとき R の変化が増大し，何れも直線性を失う．$R_0 = \sqrt{2\rho/g}$ に調節すれば，R に比例する信号を記録する事に依り正確な波形の記録を得る事が出来る．

尙注意すべき事は，上記の計算に於て g を一定の値に取つた事である．R の値を測定するには，之に電流を流して生ずる電流を測らねばならないが，海水に直流を流せば抵抗線の表面で塩分が電解し，時間と共に伝導度が著しく減少する．又波浪のある場合には伝導度が場所に依つて異り，正確な波形が得られない．従つて g が一定と見做し得るためには，抵抗値が周波数に依存しなくなる様な充分高い周波数を用いねばならない．然し波高計より測定室に至る導線の迷容量等の影響を考慮すれば，200～400 サイクルが適当な様である．

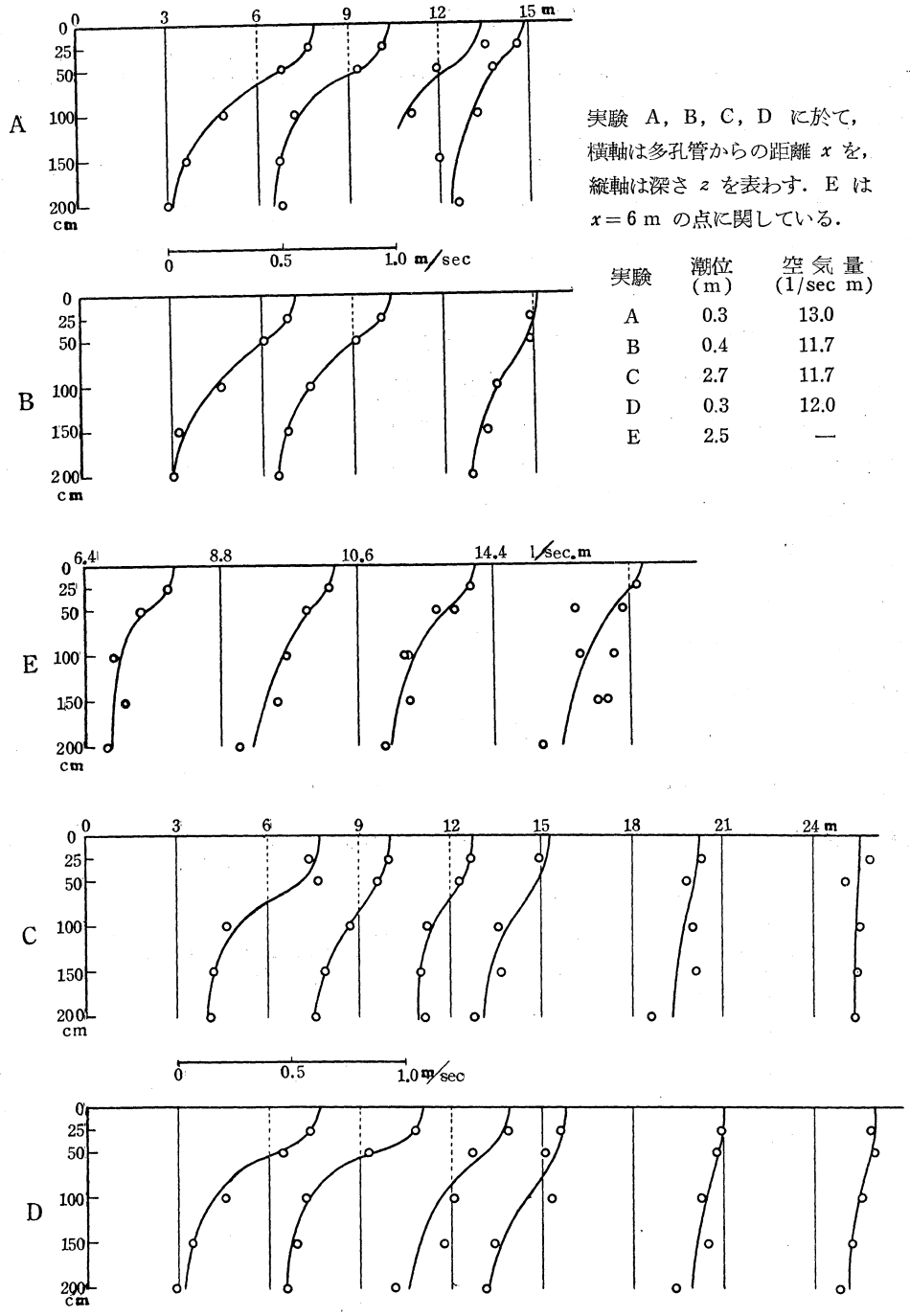
波高計端子間の電気抵抗は，波高計に対する海面の位置と直線的な関係にあるので，測定回路としては交流の一定電流を供給し，生ずる電圧に比例した直流電流を記録電流計に供給するものが必要で，第6図に示す回路を用いた．波高計を除く波形記録の全装置は第5図の通りである．波高計に至る導線の途中のスイッチ箱及び抵抗は感度の検定用であり，回路の調整や故障の発見にも便利である．抵抗は波高計に張つた抵抗線を用い，スイッチを切替えれば，その抵抗線の長さだけ海面が移動した事に相当する．



第 5 図


6SN7
6SL7
6ZP1
6ZP1
6SN7
6SN7
100KΩ V.R.
500kΩ
1.5kΩ
50kΩ
0.1μF
500kΩ
0.01μF
500kΩ
100kΩ
0.1μF
20kΩ
1.5kΩ
1:3 Audio Transx2
20kΩ
500kΩ
5kΩ
500Ω
500kΩ
0.01μF
20kΩ
10kΩ
500kΩ
10kΩ
1.5kΩ
500kΩ V.R.
10kΩ
10kΩ
500kΩ
1.5kΩ
3kΩ
500kΩ V.R.
500kΩ
0.05μF
500pF
500kΩ
500pF
Resister
500Ω
4.5kΩ
1mA D.C.
Recoring Ammeter
20kΩ
0.1μF
0.01μF
Se. Rect.
10μF
30H
10μF
80K
6.3V (Heter)
5V
240V×2
100V
A.C. line

第 6 図　波 形 測 定 回 路



実験 A, B, C, D に於て，横軸は多孔管からの距離 x を，縦軸は深さ z を表わす．E は $x=6$ m の点に関している．

実験	潮位 (m)	空気量 (1/sec m)
A	0.3	13.0
B	0.4	11.7
C	2.7	11.7
D	0.3	12.0
E	2.5	—

第 7 図　流　速　分　布

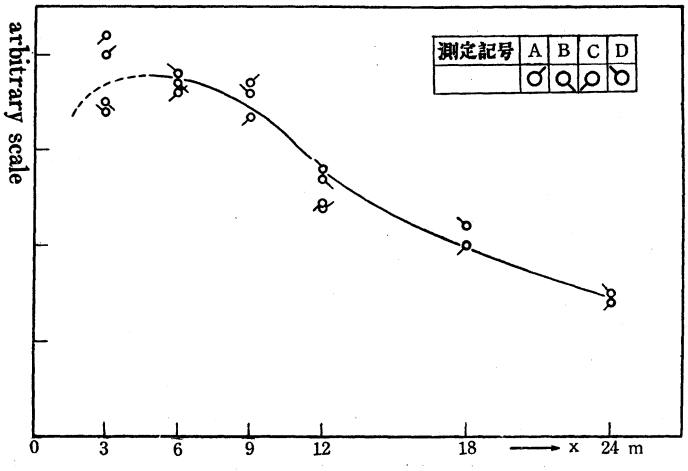
Ⅳ　測定の結果とその検討

8．流速分布　今回の伊王島に於ける空気防波堤の実地試験は本邦に於ける最初の試みであり，多くの事故及び失敗のために実施は仲々容易でなかつた．得られた結果は実験担当者にとつて会心のものではない．然しながら尙これが系統的に行われた定量的実験と言う点で世界最初のものでもあり，得られた結果は貴重であつて，その検討は重要な意義を有する．未だ資料整理は完了していないが，以下その概要及び得られた結果に就いて報告するものである．

流速は吾々に対して測定されているので，潮流の影響は直接的である．潮流の測定は1月27日及び4月13日の2回に亘つて行われた．流れは常に岸壁に沿つて北より南に向い一方的で，13～9糎毎秒の間を3～4時間の週期をもつて比較的不規則に変動している．その平均は10.5糎毎秒である．従つて以下，平均流速を以つて岸壁に沿つて流れているものとして，測られた流速は補正された．

流速の測定は前後7回に亘つて行われた．実験 A, B, C, D は同一空気量に際しての流速分布（深さ z，多孔管よりの距離 x に就いて），F, G は多孔管より 6米の距離に於ける流速と空気消費量に関するものである．E は空気量の変域は少ないが同一 x に於ける鉛直分布に関するものである．

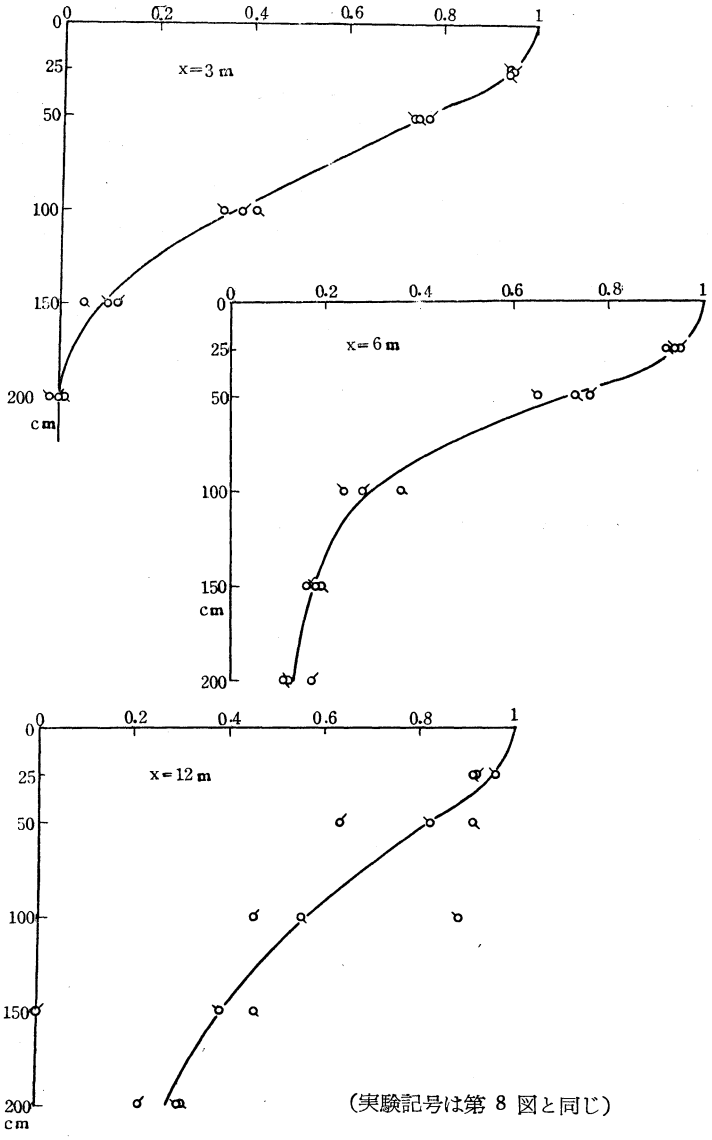
鉛直方向の流速分布は距離 x と共に如何に変形するかを見るために，第7図に潮流の補正を行つた結果が図示されている．図を見てわかる様に，上昇気泡に伴う上昇水流は表面に達して急に方向を変え，そこに狭隘部を形成して比較的薄い層の水平流となる．その後



第 8 図　流速の x 一方向の変化

は，自由表面をもつた自由噴流として次第に拡散し，層は厚くなり，流速は減少して行く．その一般的傾向は水槽実験に於けるものと同じである．

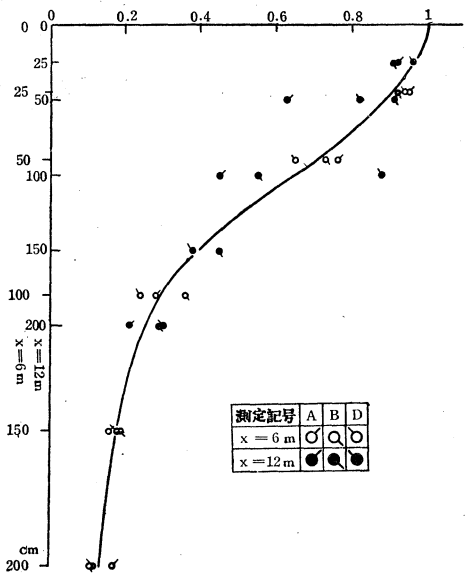
ここに注意すべきことは水平流は可成の遠方にまで到達することである．実験 D では多孔管より 18 米（多孔管深度の $2\frac{1}{4}$ 倍）の点に於て最大流速の約 2/3 に減少するだけである．一般に流速の距離 x による変化をみるために，第 7 図より A, B, C, D に就いて表面速度を求め，これを x に対して画けば第 8 図の如くなる．



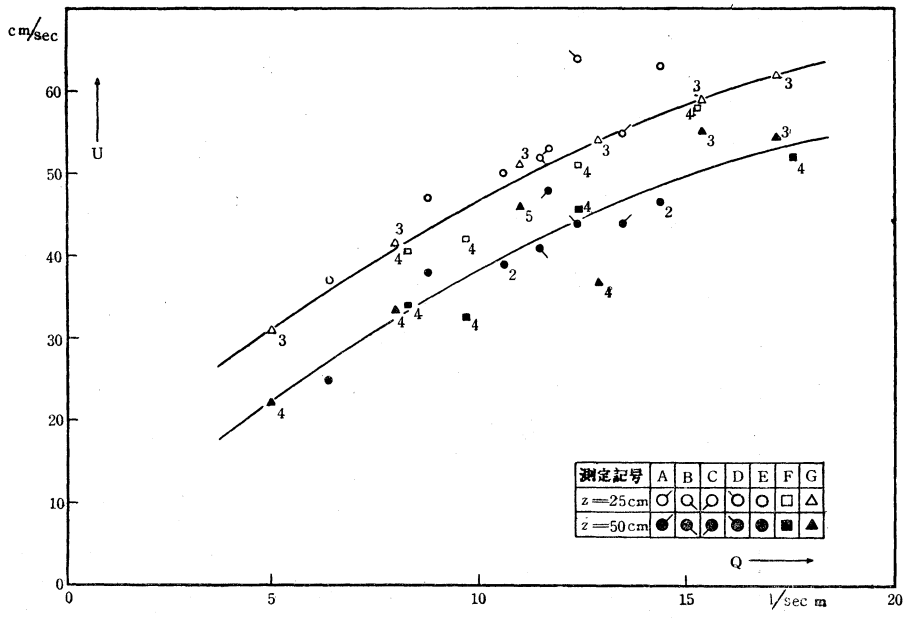
第 9 図　深さの方向の流速分布

鉛直方法の流速分布を知るために，潮位及び空気量の略々等しい実験 A, B, D のうち，$x=3$, 6 及び 12 米に於ける資料を用い，表面流速を単位にとつて z に対して流速を画くと第9図の如くなる．比較的散乱の少ないい結果である．相似律が成立つて-いることを示すものであろう．このことは，更に $x=6$, 12 米に於ける曲線を縦軸を適当な比を以つて調節して得られる第 10 図を見るならば一そう一般的であることが推察される（$x=3$ m に於ては未だ上昇流が強く現われているので除外される）．

同一の場所に於いて鉛直分布が空気量に依つて如何に変るかは興味ある問題であるが，実験 E の精度悪く良い結果は得られない．然しながら，空気量が少ないと流速は深さの方向に急に減少する様になる．逆に空気量が増加すると一定の型に近づく傾向がある．



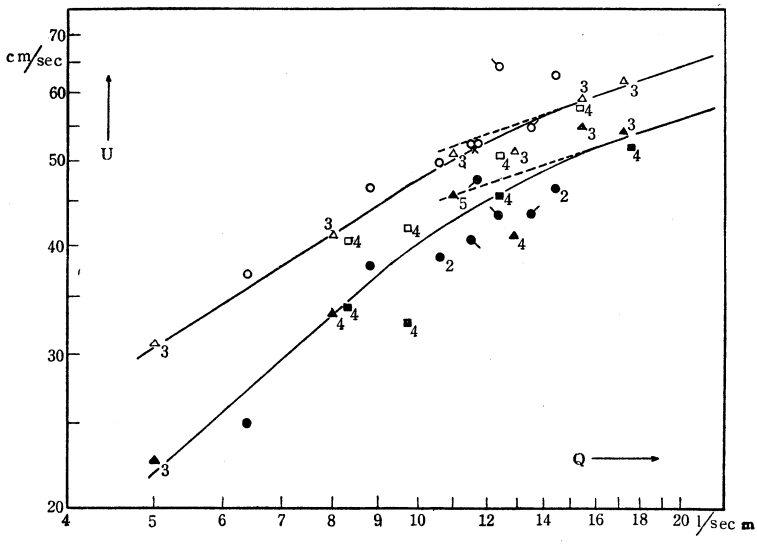
第 10 図　流速分布の相似則



第 11 図　流速と空気消費量の関係

9．空気消費量と流速の関係　実験 F,, G 及び其の他の実験結果より $x=6$ m, $z=25$ cm 及び $z=50$ cm の 2 点に於ける流速 U を取り出し，多孔管の長さ 1 米毎の空気消費量 Q に対して図示すると第 11 図[1] の如くなる．

扨て U と Q の関係をみるのに実験室で確かめられている関係（論文 I，第 7 図参照）$U \infty Q^{1/3}$ とは著しく異なる．そこで $U \infty Q^n$ を想定し，対数的に表すと第 12 図の如くなる．n が Q により変化する様がよく見られる．即ち Q が小さいときには n は大きく，Q が増大する程減少して次第に 1/3 に近づく．



第 12 図　流速と空気消費量の間係（対数表示）

実験室では発見されていなかつた bubble jet のこの性質は興味あるものであると同時に，重要な意味をもつている．これは現象の尺度の著しい相違に起因するものと考うべきであろう．従つて気泡の上昇運動とそれによつて誘起される水流とに直接関係するものとして，流体の単位体積当りの気泡の体積（気泡密度）と気泡の大きさ或は静水中の気泡の上昇速度が思い付かれる．気泡密度が大きいと，気泡の上昇に依り著しく影響される流体の領域（後流）が接近し，気泡同志の相互作用は著しく，気泡に作用する浮力は流体に体積力として一様に作用する．気泡密度が小さくなると，逆に後流領域は相互に離れ，相互作用は減少し，ためにその間を占める流体の流れは誘起され難くなる．即ち bubble jet の能率は下る筈である．

斯くて，H を多孔管の深度，g を動力の加速度として，気泡密度に対応する無次元量

1) 多孔管の深度は一様でなくその変域は 8～10.5 米であるが，空気量のそれに較べて無視しておく．図中測定点のわきの数字は，その点の重みを示している．

消 波 実 験 記 録

記号	日	時	分	天候	風向	風速 m/sec	波向	潮位 m	管内気圧 kg/cm²	水銀柱 cm	流量 l/sec	多孔管水深 m	工率 kw/m	備考
A1	2月15	13	40	晴	NW	3.2	NNE	1.9	—	—	—	9.6	—	
A2									1.35	2.7	173	9.6	0.42	ポールは斜になる，うねりは通過.
A3									1.9	8.1	333	9.6	0.81	うねりが抜け，その時ポール倒る.
A4									2.4	10.8	415	9.5	0.99	
A5									2.9	13.6	500	9.5	1.21	記録の始めはまだよくきいていない．うねりも概ね止る.
A6	〃	14	15					1.8	—	—	—	9.5	—	
B1	18	9	40	曇	NNE	7.4	NNE	1.4						
B2	〃	〃	55						1.3	2.9	178	9.1	0.42	
B3	〃	10	0						1.8	8.3	332	9.1	0.78	うねり少々通過，ポールの所へは小波が逆向に寄せる．うねり殆んど消ゆ.
B4	〃	〃	05						2.1	11.1	403	9.1	0.94	
B5								1.4	—	—	—	—	—	
C1	18	11	15		ENE	10.0	ENE	1.3	—	—	—	—	—	
C2										2.5		9.0		ポールの位置不適当で記録は不能.
C3										5.7		9.0		相当消えている様である.
D1	18	13	05		NNE	7.8	NNE	1.8	2.2	11.1	420	9.5	1.01	ポールが倒れる．よく消える.
D2									1.6	5.8	266	9.5	0.64	うねりもかなり減少.
D3								1.7	1.6	5.3	266	9.4	0.63	記録には回折波がはいる．舟よりポールを引つぱつて立てたがうまく行かぬ.
D4									—	—	—	—	—	
E1	20	9	25	雹	NW	6.8	N		—	—	—	—	—	
E2	〃	〃	30					1.8	1.3	1.9	144	9.5	0.35	水面滑らかになるのみ.
E3	〃	〃	40					1.7	2.4	11.0	420	9.4	1.01	大うねり通過.
E4	〃	〃	45					1.6	2.8	13.7	496	9.3	1.18	極めて大きいうねりは通るが他は消える.
E5	〃	〃	55						—	—	—	—	—	
F1	20	13	45	雪	NNW	11.5	N		—	—	—	—	—	
F2	〃	〃	55					0.9	1.3	3.2	186	8.6	0.42	小さなうねりは周囲で曲りこむ．若干効くらしい.
F3	〃	14	10					1.0	1.8	7.8	292	8.7	0.66	大うねりは通るが，小さいのは消える.
F4	〃	〃	15						—	—	—	—	—	
F5	〃	〃	20					1.0	3.2	12.8	500	8.7	1.13	大うねりも若干きく様子.
F6	〃	〃	30			10.0			—	—	—	—	—	
G1	21	10	50	吹雪	NNW	6.3	NNE	1.6	—	—	—	9.3	—	
G2	〃	〃	55						1.2	1.9	140	9.2	0.33	小波のみ消える.
G3	〃	11	0						1.5	4.5	230	9.2	0.54	小さなうねりも消える.

消　波　実　験　記　録（つづき）

記号	日	時	分	天候	風向	風速 m/sec	波向	潮位 m	管内気圧 kg/cm²	水銀柱 cm	流量 l/sec	多孔管水深 m	工率 kw/m	備考
G_4	21	11	05	吹雪	NNW	6.3	NNE		1.9	6.6	306	9.1	0.72	中位のうねりも減衰.
G_5	〃	〃	15						2.9	11.8	464	9.0	1.08	4秒程度の大うねりのみ通過
G_6	〃	〃	20					1.3	—	—	—	9.0	—	
H_1	23	11	30	曇	NE	5.0	NNE		—	—	—	—	—	
H_2	〃	〃	37					1.4	1.4	2.3	160	9.1	0.37	
H_3	〃	〃	43					1.3	2.2	8.3	358	9.0	0.83	
I_1	3月5	9	45		NNE		NNE	1.4	—	—	—	—	—	波長短く波面汚く岸壁よりの反射が複雑であるが波，面は概ね多孔管に真正面から来ている. 小さな波がずつと沖で消えているのが見られた.
I_2	〃	〃	50					1.4	1.3	2.6	168	9.1	0.39	
I_3	〃	〃	54					1.4	2.0	6.1	292	9.1	0.68	
I_4	〃	〃	59					1.3	—	—	—	—	—	
J_1	9	13	35		N	6.0	NNE	0.3	—	—	—	—	—	
J_2	〃	〃	49					0.3	1.2	1.6	128	8.0	0.27	小波が消える. 大波は通過.
J_3	〃	〃	53					0.2	1.35	2.9	179	7.9	0.38	ポールの位置は良好. うねりを除きよく消える.
J_4	9	14	0		N	6.0	NNE	0.2	—	—	—	—	—	
J_5	〃	〃	05					0.2	1.4	4.5	245	7.9	0.51	ポールは引寄せられる. うねりは大きいのを除き概ね止るらしい.
J_6	〃	〃	09					0.2	2.6	8.5	379	7.9	0.79	
J_7	〃	〃	20					0.2	—	—	—	—	—	
K_1	13	6	0	曇	WNW	6.0	N	1.1	—	—	—	—	—	低長なうねり.
K_2	〃	〃	15					1.2	2.0	5.5	278	8.9	0.66	記録状況良好. うねり通過.
K_3	〃	〃	20					1.3	2.9	8.5	380	9.0	0.88	うねりは波長が短くなるのみで消えぬ.
K_4	〃	〃	26					1.3	53.3	14.5	530	9.0	1.23	
K_5	〃	〃	35					1.4	—	—	—	—	—	マノメーター配管に水がたまつた為め K_4 より水銀柱の読みがあやしい.
L_1	13	9	52		NNW		NNE		—	—	—	—	—	
L_2	〃	10	10					2.5	2.1	5.4	280	9.2	0.66	回路調子悪し. 5～6秒程のうねりあり. 波向は概ね良好 大うねりは通り抜ける. (最大流量でも)
L_3	〃	〃	21					2.5						
									3.0	9.1	412	9.2	0.98	ポールは原因不明で沈む. 岸よりの回折波あるも消えて行きポールに影響はさほどない模様.
L_4	〃	〃	27					2.5	—	—	—	—	—	
L_5	〃	〃	37					2.5	3.0	9.1	412	9.2	0.98	
L_6	〃	〃	19					2.4	3.5	10.2	462	9.1	1.08	大きなうねりは通る. ポール頂上が冠水, 記録が変になる.
M_1	13	14	13						—	—	—	—	—	
M_2	〃	〃	24					0.9	1.8	4.7	250	8.6	0.55	
M_3	〃	〃	30					0.8	2.5	7.3	345	8.5	0.76	
M_4	〃	〃	36					0.7	3.35	9.8	445	8.4	0.98	
M_5	〃	〃	45						—	—	—	—	—	

$$\xi = Q/g^{1/2} H^{3/2} \quad \cdots\cdots (3)$$

を導く.

実験室に於ては $H \doteqdot 85$ cm, Q の変域は 1～5 l/sec mであつた. 従つて ξ の変域は $0.41 \times 10^{-3} \sim 2.04 \times 10^{-3}$ であつて, その範囲内では ξ の影響は見られなかつた. 今回の実地試験に於ては ξ は $0.5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ の間にあつて, その最大値も実験室に於ける最小値の約半分である. 従つて n の変化は parameter ξ によるものであると考えられるであろう. 指数 n が ξ に依つて変化することの意味は, 海水中の気泡の量が少なくなつて, 気泡群相互間の干渉が薄らぎ, 気泡は夫々単独の運動を行い, ために, 浮力は流体に作用する容積力として取り扱えなくなることにある. ξ の影響が無視され $U \propto Q^{1/3}$ が成立する様になる限界は第12図より $Q_C \fallingdotseq 15$ l/sec m である. 従つて $H = 9$ m として

$$\xi_C \fallingdotseq 1.8 \times 10^{-4} \quad \cdots\cdots (4)$$

深さ H に対する限界空気量, 限界工率は

$$Q_C = \xi_C g^{1/2} H^{3/2}, \; P_C = \rho g Q_C H_0 \cdot \log_e \frac{H + H_0}{H_0} \cdots\cdots (5)$$

以上の理解が正しく, ξ が有効な parameter として役立つか否かは, 今後空気量を極く小さくし, 詳細な水槽実験を行うことに依つて確められねばならない.

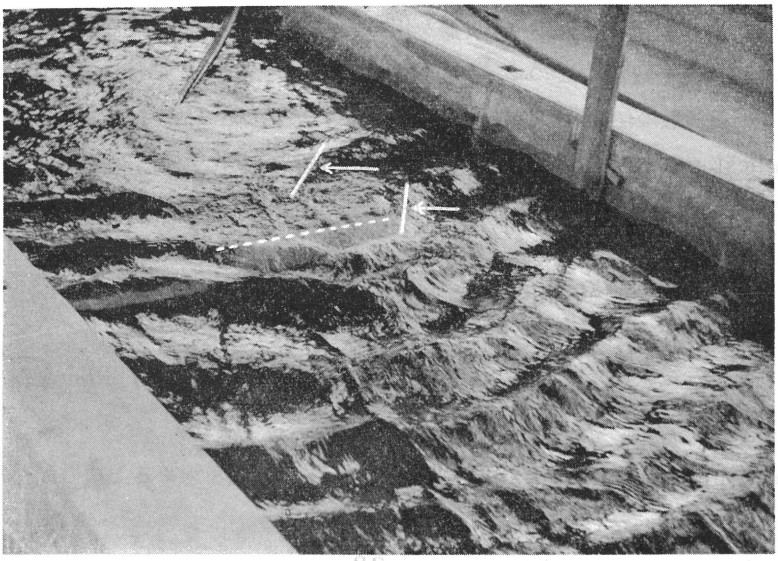
10. 消波実験 実験準備の完了した2月14日以降に於て, 風強く, 波浪が劇しくて, 波面が適当であつたあらゆる機会に, 消波実験を行う様に努力し, 幾つかの資料を得ることが出来た. 表 (16, 17頁) は実験記録であり, 風向, 風力, 潮位, 空気消費量等の必要な資料の他に, 観察による消波状況が記されている. 又特に記述のない場合には同時に波形記録がとられている.

11. 廻折波に就いて 空気防波堤の実験に際して予期していなかつた波の廻折に依つて, 消波能率の判定に大変苦しめられた. 実験記録を見て最も顕著なことは, 観察記述にある様に, 消波が観察によつて確認されている場合でも波型記録には余りそれが現われていないことである. これは比較的に細い波が消えて表面が滑かになるための錯覚もあるが, 多孔管の端からの廻折波及び岸壁からの反射波に起因することも, 記述に頻繁にその事が書かれていることから見て承認しなければならない.

減衰波型の記録をみるのに, 時折孤立した大きな波形が記録されている. これは特に波高計に着目して肉眼観測していても感ぜられることで, 消波が充分行われているであろう海面に時折孤立した大きなうねりが現われるのを見る. 然し観察に依つてこれが廻折によるものであることは, 視野が広過ぎて確認は困難であつた.

斯くて実験室に戻り, 水槽実験により廻折の有無及びその模様を確めた. 波長, 多孔管の長さ及び深度を総て実地試験の場合と相似にした. 然し波長は 20 糎程度なので表面張

力の影響はなく，波は重力波である．従つて bubble jet の能率はさておいて，実物との間に相似律が成立していると考えて差支えない．空気量は廻折が行われなければ充分に消波されているだけ使用している．実験の模様は写真1に示されている．



写真—1．空気防波堤の端に於ける波の廻折

写真には消波領域に都合よく向を変えて進行して行く波が示されている．bubble jet に向つて来た波は水平流の影響を受けて，そ流速が最大な中心線に沿つて集中して来る．従つて bubble jet の中央部にエネルギーが集り，ここで波は破ける．又同時に斯の如くして予め好都合に向を変えられた波は jet の両端附近の速度変化の最も著しい部分で，消波領域に向つて急激に向を変えられる．この様に，好都合な場合には jet の両端から静かな領域に向つて孤立波が放たれる．これが波型記録及び波高計ポールによる観察に現われる時折の大きな波なのではなかろうか．

実験に用いた多孔管の長さは 50 糎，深さは 15 糎であり，波の週期は 0.375 秒（波長 21.9 糎）であつた．Bubble jet 後方に於ける波高は，使用した空気量に関係なく，消波領域に亘つて原波の約 1/2 であつた.[1] 即ち廻折現象のために，波高は精々半分に減ずるだけであると言うことが出来る．この事実は実地消波実験の結果を理解する上に役に立つ．

12．波型解析　今回の実験に際して最も遺憾なことは波高計の破損のために，原波と減衰波の同時記録の代りに，多孔管の後方に於てとられた送気の前後に於ける波型記録の比

---

[1] 空気量は幾段かに調節されたが，いづれも消波には多量に過ぎ，ξ は極めて大きい．ξ の小さい場合には何うなるであろうか．今後の定量的研究を俟たねば，この結論は確定的なものとならない．

較検討を行つたことである．従つて週期の短いスペクトルの部分が，風力の変動に伴つて測定期間中に変動し易く比較を不確実にするばかりでなく，実験の各段階の記録時間を永くすることが出来なかつた（3～6分）．更に波高計の不安定のために無効となつた部分もあつて統計資料として充分でなかつた．

波形の分析は総て電気振動調和分析器を用いてスペクトル分析をする計画であつたが，その製作が間に合わなかつたので，代表的な 2 つの記録を選んで野口式調和解析器に依つてフーリェー級数の係数を求めるきわめて労多き方法に従つた．他方参考のために one third highest waves の方法に依つて平均波高と週期の変化を検べてみた．

i）実験 D.[1] 風向 NNE，風速 7.8m/sec，波向 NNE，空気消費量 14 l/sec m，工率 1.01KW/m.

長い波長の部分を含まないで，大体週期が 2 sec から 3 sec の間の成分だけからなつている例として選ばれた．

簡単のため，途中の空気量の場合は省略して，空気量最大の D_1 と送気を中止した場合 D_4 を比較してみる．

one third highest waves を選んで平均波高と平均週期を求めると次の如くなる：

	平均波高	平均週期	
原　波	28 cm	2.2 sec	波高比 = 0.47.
減衰波	13 cm	2.1 sec	

前節に述べた廻折波の影響を考慮するならば，波高比 = 0.47 は消波能率として優れたものと言える．

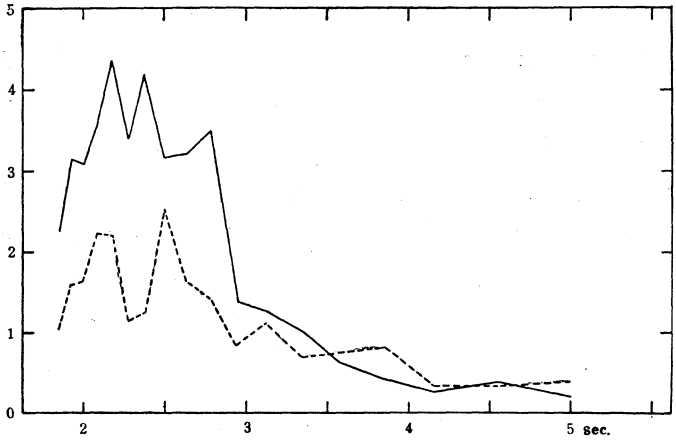
平均週期が短く，これは波長 7.2 米に対応している．然しながらこのことは，使用した空気量，或は工率に依つてはこの様な波だけしか消波出来なかつたと言う意味ではない．平均週期が消波によつて変化しないことからみて，次の様に理解すべきである：波の成分が 2～3 秒程度に亘つていて，それらが一様に消波作用を受けているのである．即ち 3 秒程度の波まで消波することが出来ることを意味しているのである．この事はスペクトル分析の結果をみれば明瞭である．

調和解析は 1 回に 50 秒の記録に就いて行い得たので，記録を 3 つに分け，各部毎にスペクトルを求め，最後にそれ等の平均を求めた．第 13 図はその結果を示すもので，横軸は波の週期，縦軸は自乗平均から求めた平均波高である（但し尺度は便宜的である）．

実線は原波で，点線は消波作用を受けた波である．2 つのスペクトルを比較すれば，消波の模様がよく理解出来る．週期の短いものは良く消え，長くなると消え難くなり，遂には全く影響を受けなくなる．3.5 秒程度で消波作用が始まり，3 秒以下になると活潑になつ

---

1) 消波実験記録16頁参照



第 13 図　消波実験 D. 消波スペクトル
実線は原波，点線は消波作用を受けたもの．横軸は週期，縦軸は波高（便宜の尺度）

て来る．

消波作用を受けた減衰波スペクトルに 2.5 秒附近に著しい山のあるのは，波の廻折を無視しては理解することは困難である．この様に，廻折波を考慮し，スペクトルの比較から 3 秒までの波が消波されていると推定して差支えないであろう．

ii）実験 F. 風向 NNW，風速 11.5m/sec，波向 N，空気消費量 16 l/sec m，工率 1.13 KW/m.

この実験系では，実験を全く送気のない場合から順次行つて最大流量の V_5 にかかる頃より波の様子が変つたので，比較のためその直後に送気を中止し原波の記録をとつた．従つて F_5 と F_6 とを比較することにする．

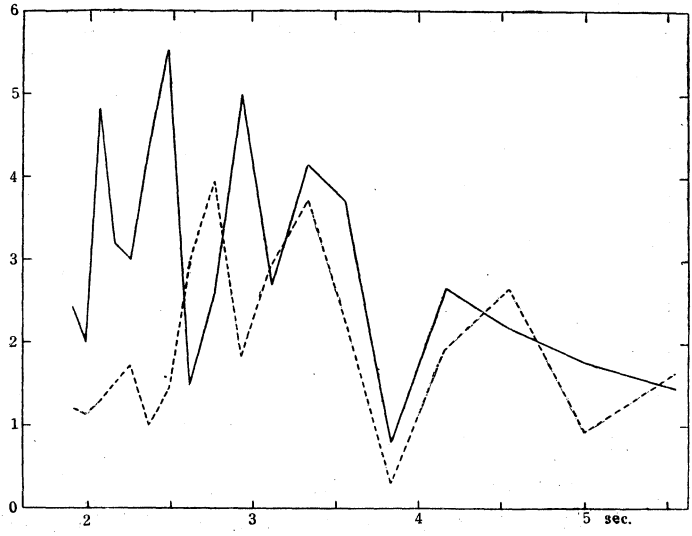
この実験に際しては風が少しく西にふれていたので週期の長い沖波が廻り込んでいた．従つて波は週期 2.5 秒附近の成分と 4.5 秒附近の成分とからなつている場合である．消波作用を受けると短い成分が消えて長い成分が残るから，平均週期は増大する．One third highest waves を選んでやつてみると：

	平均波高	平均週期	
原　波	43 cm	2.9 sec	波高比 = 0.63.
減 衰 波	27 cm	3.5 sec	

この場合に消波の波高が大きいのは，短い波の部分の廻折の他に，週期の長い部分がそのまま残るためにもよる.[1]

調和解析には，波高計が傾き F_5 の記録中利用可能の部分が僅かに 100 秒に過ぎなかつ

[1] この場合には多孔管と波頂との傾きが 22° もあつたので bubble jet の端からの廻折も著しかつた．



第 14 図　消波実験 F．消波スペクトル．

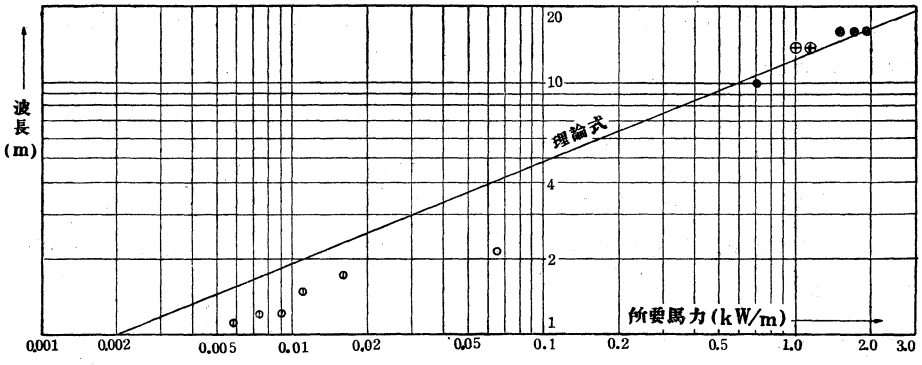
実線は原波，点線は消波作用を受けたもの．横軸は週期，縦軸は波高（便宜の尺度）

た．F_6 には 150 秒の記録が利用された．解析の結果は第 14 図に示されている．

実験の途中で風が変つたため比較が不当であり，波高計が傾いたため消波作用を受けた波の波高測定が精密を欠いたためよい資料とは言えないが，消波作用を受けたスペクトルに於て，2.8 秒の山は廻折波によるものである事を考慮するならば，この資料から前の場合と同じ様に週期 3 秒以下のものは著しい消波作用を受けていると推定することが出来る．

以上 2 つの消波実験から，週期 3 秒（14 米）の波に対する消波所要動力としてそれぞれ 1.01，1.13 KW/m が得られる．これ等の値は第 15 図に記入されている．殆んど理論曲線（論文 I，(5.4) 参照）の上にあることは特筆すべきである．

消波実験記録に掲げられた其の他の波形記録に就いては，スペルトル分析器の完成をま



第 15 図　波長と消波所要動力

● 外国の実例　① 応力研究室内　○ ソ連室内　⊕ 伊王島実験

つて，整理，検討を行い，次の機会に発表する予定である．

13. 渦動粘性の作用に就いて　吾々は今まで空気防波堤の消波機構は主として波に向う水平流の流動によるもので，これに渦動粘性の作用が加わるものと考えていた．水槽実験の消波能率が極めて悪いのは（第15図参照），装置が小型であるのに気泡が大きく，bubble jet の能率が悪いためであると解釈していた．即ち水平流の流速が小さいため空気防波堤の機能が低下されるものであると考えていた．大型の実地試験では装置全体の規模に対して気泡の大さは小なくなり，水平流が速くなる．ために bubble jet の能率，従つて空気防波堤の能率も良くなるので，第15図に於て外国の実例が理論曲線の近くにおちるものと想像されていた．然るに実地試験に於ても水平流の流速と空気消費量の関係は Q が適当に大きければ，実験室に於けるものと略々同じであり，而も図に見る様に消波能率は著しく向上されている．この事実は一体何を意味するのであろうか．

今前節に取り扱つた実験 D, F の場合に就いて考えてみる．均らして週期 3 秒，波長 14 米，空気消費量は約 15 l/sec m で工率は 1.1 KW/m である．この空気量に対する最大流速は約 60 cm/sec，これは波の進行速度の 12.6 % に過ぎない．従つて水平流が波のエネルギー伝播を阻止するには程遠い．この流れは波長を 19 % 縮め，波高を 9 % 高める．従つて渦動粘性の効果を 1.5 倍高めるに過ぎない．

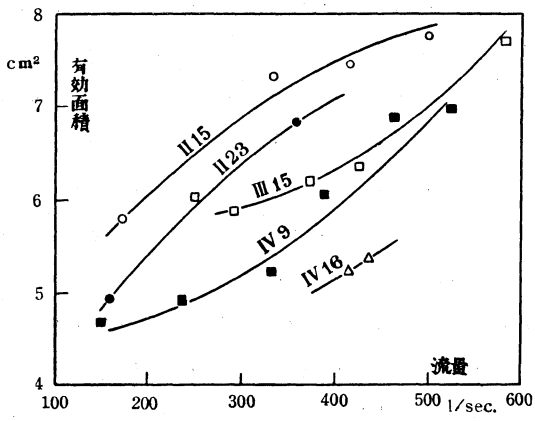
60 cm/sec の流速を限界速度とする様な波の進行速度は一様流の場合に 2.4 m/sec で，その波長は 3.7 m である．水平流の有効な長さとして 15 m を仮定するならば，この様な場合に渦動粘性に依つて週期 3 秒の波が 1/2 に減衰するためには，渦動粘性は自由噴流の場合の数倍でなければならない．これは 1 つには渦動粘性に依つて崩壊した波のエネルギーが再び乱流のエネルギーとなり，渦動粘性を強めることに起因するであろう．2 つには自由表面に接した噴流に際しては特に乱れは劇しいのではないかと疑われる．最後に，上昇流は浮力を原動力としているので，自由噴流と対比さすべきではなく，むしろ物体の後流に較べるべきものであると考えるならば数倍の増加は容易に説明される.[1] これ等の判定に就いては今後の実験室に於ける詳細な研究を俟たねばならないが，消波作用に過動粘性が重要な役割を持つ事は空気防波堤の研究に際して充分考慮されなければならない．渦動粘性が主な要素ならば，混合距離の大さ，従つて多孔管の深度が著しく消波に影響する筈である．他方多孔管の深度を増加さすならば parameter ξ は減少し，bubble jet の能率は低下する．従つて多孔管の深度を如何に決定すべきかは今後の最も重要な問題となる．

14. 多孔管の縮流係数に就いて　多孔管の設計に当つて，圧縮空気が水中に噴出する場

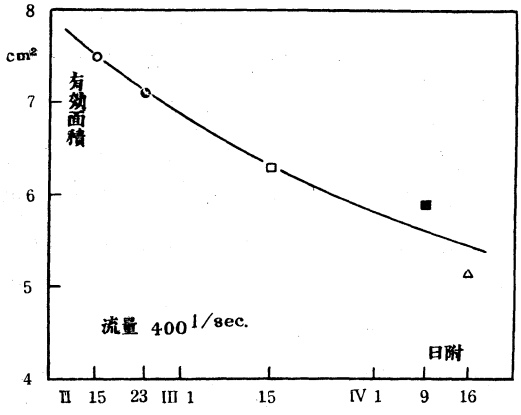
---

[1] 後流の場合に混合距離は自由噴流の場合の 3 倍程である．

合の縮流係数を知ることは重要な問題である．吾々は当初の設計に際して 0.6 を採用した．その際の実面積は 0.632 cm²/m で，多孔管全体としては 19.0 cm² であつた．消波実験に際して管内の圧力，流量及び多孔管の深度が測られている．これ等の資料を用いて，実際にこの係数の値を知ることが出来る．然し，一般には多孔管は次第に腐蝕して行くので，有効面積をもつて満足しなければならない．



第 16 図　a



第 16 図　b

第16図 a は日附の日に行われた実験に就いての計算結果を示すもので，有効面積は一定とならず，流量の函数である．即ち有効面積は流量とともに著しく変化する．この傾向はどの日附の実験に就いても成立つが，管の腐蝕に依つて総体として減少して行く．例えば 400 l/sec の総流量に対する有効面積を各日附の曲線から読みとつて，これを日附に対して図示すると第19図 b の如くなる．腐蝕に依つて断面積の減少して行く様子がよく見られる．

多孔管を設置したのが 2 月 4 日であるから，最初に流量測定の行われた 2 月 15 日までに気孔の面積は縮少している筈である．その割合を仮に第16図 b から推測すると 0.92 である．この率を一様に使用するものとして，設計当初の実断面積と第 16 図a から読みとつた有効断面積とから次の結果を得る：

Q l/sec m	5	10	15	20
縮流係数	0.32	0.39	0.45	(0.47)

茲に気孔の直径は約 1.5 mm である．

縮流係数が流量に依つて変化するであろうことは物理的にも考えられることである．

V 結　　語

15. 今回の伊王島に於ける実験は，本邦に於ける最初の空気防波堤の実物試験であると同時に，系統的な測定実験である点に於て世界最初のものである．元来，空気防波堤実用化の前提として，今までに得られている理論的，実験的な知識，特に消波対象の波長と所要動力に関する関係式を実際の海の波に就いて確め，空気防波堤設計の基礎となさんとするための試みである．そして経費，使用可能の空気量，実施の便等を考慮し，且つ確実に結果を得る条件のもとに伊王島が選ばれた．その際対象波の波長は約 15 米と限定された．

種々の失敗があり，多くの困難が伴つたが貴重なる幾つかの資料が得られた．特に，今までに解析された2つの場合に就いて，波長と所要動力の関係は理論と略々一致している．従つて今度の現地実験は所期の目的を達し，成功を収めたものと言うことが出来る．

今回の実験から得られた結果を要約してみると，先ず流速測定から：i）空気量 Q と多孔管の深度 H に関する副変数 ξ（式 (3) 参照，海水中に含まれる気泡容積の割合に関する）があつて，これが或限度以上になると，ii）流速分布には相似則が成立し，iii）空気量 Q と流速 U の値には実験室にて求められた関係 $U \propto Q^{1/3}$ が成立つ．

次に消波実験に就いて：i）現地実験で絶えず問題となつた bubble jet の両端からの廻折波を水槽実験に依つて確めた．多孔管が波長の 2 倍程度の場合には，廻折波に依つて消波領域の波高は原波のそれの 1/2 程度以下になれない．ii）消波の模様は波形のスペクトルを比較することに依つて明瞭に知ることが出来る．One-third highest waves の平均値に依つて空気防波堤の性能を知ることは困難である．iii）消波機能に対して渦動粘性は重要な役割をもつている．渦動粘性の大さは普通の自由噴流の場合の数倍である．従つて iv）多孔管の深度が能率に著しく影響すると考えられる．

これ等の結果から今後に対して次の様なことが希望される：i）尺度を大きく変えたために発見された副変数 ξ 自身及びその役割を実験室に於て吟味し，bubble jet の性能の寸法効果を明瞭にする．このことは今後の空気防波堤の研究及び実際の bubble jet の設計のために重要である．ii）実験室に於て bubble jet の両端からの廻折波の研究を行う．iii）渦動粘性による消波機構を実験室にて徹底的に追求する．

この研究に対して文部省科学試験研究費補助金が下附されている．

（昭和30年9月26日 受 理）