

反射に関する基礎的研究

室 田 明*・山 田 哲 二**

1. 概 説

岩手県大船渡湾の、チリ津波による湾奥部の局部的被害は、湾口から侵入した津波が、湾側岸に斜め入射し、反射した波が、cliffにより再び反射するといった、下図に示すような反射をくり返し、エネルギーが湾奥局部に集中したことが、被害を大きくした一因と考えられている¹⁾。反射によるエネルギーの集中現象は、これらの自然



海岸と同じく、水面の高度利用の進んだ港内で多く見られ、特に鉛直壁で囲まれたslip内での被害が、多数報告されている²⁾。一方、消波構造物の消波機構について現在適切な説明がなされていない

が、巨視的には消波効率は、反射率の実測によって定量的に把握されるものと思われるから、この意味でも反射の現象の正確な理解が必要であると考ええる。

反射率の算定に従来広く用いられているものに、Healyの方法がある。入射波の波高を H_I 、反射波の波高を H_R とすると、反射率 R は、

$$R = \frac{H_R}{H_I} \quad \dots\dots\dots(1)$$

で定義される。入射波高、反射波高をそれぞれ同時に直接観測することは、技術上不可能であるが、入射波形、反射波形が、それぞれ sine 関数で表示でき、合成波形がそれらの重ね合わされたものと考えられる場合には、合成波の波高分布を観測することによって間接的に、 H_I 、 H_R を求めることができる。すなわち、部分重複波における最大波高 $H_{\max}$ 、最小波高 $H_{\min}$ を測定すれば、

$$H_I = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{2}, \quad H_R = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

と考えられるから

$$R = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

理論的には、Miche が水平面から角度 θ だけ傾いた不浸透面から反射される最大波形勾配を深水波に対して求めた式

$$\left(\frac{H_R'}{L_R}\right)_{\max} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 H_R' : 理論的な反射波の波高

L_R : 反射波の波長

これを使って、 $(H_R'/L_R)_{\max}$ より大きな波形勾配の波は、完全反射は起こらないで部分的に反射し、そのときの理論的な反射率 R' は、

$$R' = \frac{(H_R'/L_R)_{\max}}{(H_I/L_I)}, \quad R' \leq 1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

になるとした。実際の反射波高は、面の粗滑、浸透性などを考慮せねばならないが、Miche は斜面性状のみに関係する係数 ρ を使って、実際の反射率 R を、

$$R = \rho R' = \rho \frac{(H_R'/L_R)_{\max}}{(H_I/L_I)} = \frac{H_R}{H_I} \quad \dots\dots\dots(6)$$

で表わした。

不浸透面の粗滑に応じて、 ρ の値は、0.68 から 1.0 までの間にあるとされている。

結局、反射率 R は式(6)に式(4)を代入することによって

$$R = \rho \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \cdot \frac{L_I}{H_I} \quad \dots\dots\dots(7)$$

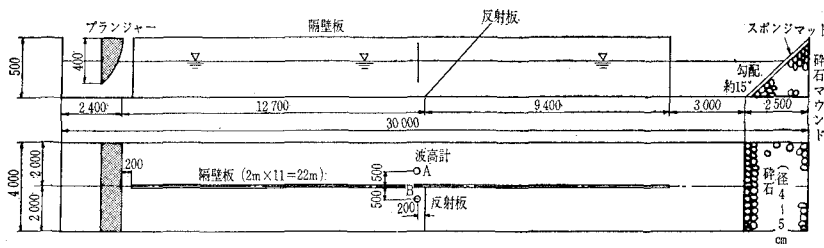
で表わされる。すなわち、反射率 R は、のり面勾配 θ 、補正係数 ρ と入射波波形勾配 H_I/L_I の関数と考えられるが、のり面傾斜角 θ が大きい場合には、反射波の波形勾配は θ よりも水深 h と波長 L_I との比 h/L_I の影響の方が大であり、特に h/L_I が小さいときには、その効果が大きいことが、岩垣³⁾らの実験に報告されている。このほか、のり面の形状、粗度および透水性の反射率におよぼす影響が、非常に大であると考えられるが、これらについての研究はわずかであって、その効果を定量的に見積ることは、現在の段階ではできないようである⁴⁾。

前述したように、Healyの方法は、入射波高、反射波高を直接測定することなく、反射率を算定する便法であるが、その方法がかなり不自然な仮定にもとづいておるのみならず、反射現象について十分な情報を提供するものではない。たとえば、斜面上で放出される碎波エネルギーを算出するためには、入射波エネルギー、反射波エ

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部

** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科

図-2 実験装置の配置
(単位 mm)



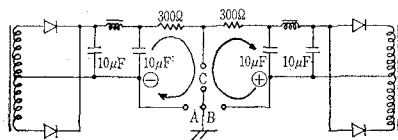
ネルギーを知る必要があるが、そのためには反射波高のみならず反射波形そのものを観測したい。本実験の目的もここにある。

2. 実験装置と方法

前述の実験目的に沿って、本実験の実験原理はつぎのごとくである。幅の広い実験水路を隔壁によって縦方向に二分し、片側に反射体を設置して入射、反射による合成波を発生せしめ、他の側は発生波を自由に通過させて、入射波を代用せしめる。電気的に記録される合成波から入射波を同じく電気的に引き算すれば、反射波形そのものが記録されるはずである。この場合の反射体は滑面不浸透斜面とし、図-2 の位置に一辺 2 m の鉄製正方形板の一边を水路底部に hinge で固定し、上部端 2 カ所を支持し、傾斜角は 90° から 10° まで連続的に変化させうるものとする。造波装置は plunger-type であり、その周期は約 0.8 秒から 3 秒の範囲で連続的に変化させることができる。波形の測定には、電気抵抗線式波高計を使い、ビジグラフに記録させた。

完全に感度を一致させた 2 台の波高計 A, B を図-2 のように、水路中心線 (隔壁) に関し対称の位置に配置すれば、A, B で観測される入射波形は、発生波の均一性、両水路の波に位相のずれのないことが保証されれば、全く同じものになり、B の入射波形を A のそれで代用させることができる。反射板前面の波高計 B で合成波形が記録され、A で代用されるその時刻の入射波形を減ずれば、反射波形が得られる。図-3 に引算回路図を示す。A, B 2 つの回路を C でつなぐと A, B 回路の電流は、どちらも矢印に示すように時計まわりであるから、C の回路には A と B の差だけの電流が流れることになる。いま、A の回路に波高計 A からの入射波形に応じた電流が、B の回路には波高計 B からの合成波形に応じた電流が与えられると、C の回路には、その差である反

図-3 引算回路



射波形に対応した電流が得られる。A, B, C をそれぞれ記録装置に接続すると、所要の合成波形、入射波形、反射波形の時間的変化が連続的に記録される。

通常、反射波形そのものを抽出することは、不可能であるが、線型重ね

合わせの仮定が容認される限り、上の方法によって実験的には反射波形を記録することが可能となる。

水深は 20 cm から 32.4 cm までの範囲で、 h/L_I を 0.107, 0.12, 0.14, 0.16 の 4 段階に分けて、そのおのおのにつき波形勾配を 0.011 から 0.054 の範囲で 4~5 種類変化させ、またそのおのおのにつき反射板傾斜角を $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ 、以下 5° 刻みに 10° まで変えた。

3. 予備実験

反射板前面の波高計 B で反射波形が記録され始めてから、plunger 部分で反射され、再び反射板に到達するまでの時間が有効な観測時間となり、これをなるべく長く、したがって有効な反射波をなるべく多くするためには、反射板の位置を造波装置から遠く離せばよいが、そうすると入射波観測用の水路の側で水路端部からの反射波が、入射波を乱すことになり、それを防ぐには端部での反射を完全に防ぐ必要がある。この目的のために、図-2 のような mound を端部に作り、その消波効果をみたのであるが、結果は図-4 のように砕石のみの場合には約 35%、その上にスポンジを置いた場合でも約 20% の反射があり、入射波測定用水路端部からの反射も考慮せねばならないことがわかり、結局水路中央部に反射板を置き、その直前面位置で測定するのが最も有利な方法である。

なお、図-4 で最初の crest-1 は入射波、crest-2 は水路端部からの反射波、crest-3 は、さらに plunger にあたり再び反射したものである。

plunger-type 造波装置で得られる波形は、図-5 のようなものであり、かなり規則的な波を得ることができる

図-4 mound の消波効果

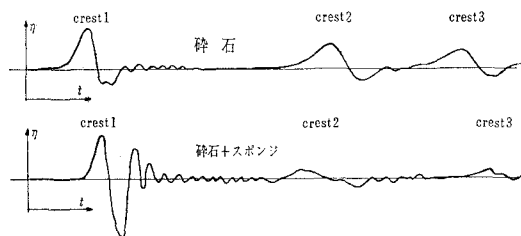
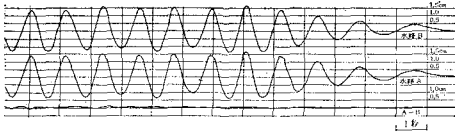


図-5 引算回路による観測波形〔発生波〕
(実験 No. 3-4)



が、周期により多少の違いはあるけれども最初の数波は plunger の回転が定常になるまでの過渡状態にあるため、定常状態のそれとは、周期、波高において大きく異なっている。もちろん計算にはこれらの波は除外し、定常状態以後のものを対象にしており、短周期のもので5波目から12波目までの8波、長周期のもので4波目から9波目までの6波を採用した。

2. で述べたように、B水路の入射波形をA水路のそれで代用するのであるから、両水路の波形は完全に一致し、なおかつ位相差があってはならない。これを check するために反射板を水路から引き上げて両水路共素通しにしたときの波形記録が図-5で上からB水路、A水路それらの差の順になっている。これから見ると上の方法は十分有効のようである。

測定は各 case につき1回行なうが、砕波があった場合の反射波形の再現性をみるために、数 cases につき特にくり返し測定を行なった。確率誤差は表-1のようであり、これ位の変動は他の精度からいっても大きなものでないから、通常各 case につき1回測定を原則とした。

表-1 砕波のあった場合の反射波の再現性
(実験 No. 4-5 [$\theta=15^\circ$])

波 番 号	最確値と確率誤差
5	3.14 ± 0.12
6	4.21 ± 0.15
7	4.27 ± 0.10
8	4.06 ± 0.12
9	4.44 ± 0.14
10	4.68 ± 0.14
11	4.64 ± 0.15
12	4.67 ± 0.14

4. 実験結果

滑面不浸透性斜面の反射では入射波特性、反射板傾斜

表-2 実験波の諸元

		$h/L=0.107$					$h/L=0.12$				
實驗 No.		1—1	1—2	1—3	1—4	1—5	2—1	2—2	2—3	2—4	
諸元											
波 長 (cm)		234	234	234	234	192.33	209.1	209.1	209.1	168.07	
波 高 (cm)		3.70	6.58	2.59	4.72	6.05	3.76	4.60	4.54	3.71	
H/L		0.016	0.028	0.011	0.020	0.031	0.018	0.022	0.032	0.040	
		$h/L=0.14$					$h/L=0.16$				
實驗 No.		3—1	3—2	3—3	3—4	3—5	4—1	4—2	4—3	4—4	4—5
諸元											
波 長 (cm)		143.18	143.18	143.18	143.18	231.64	200.91	200.91	200.91	200.91	154.86
波 高 (cm)		4.58	7.21	5.60	2.99	3.67	5.02	5.71	7.00	4.42	8.28
H/L		0.032	0.050	0.039	0.021	0.016	0.025	0.028	0.035	0.022	0.054

角、水深が反射率に影響をおよぼすと考えられるが、実験手順として、 h/L_I を一定にして波形勾配が概略 0.01~0.05 の範囲にあるような波を起こし、反射板を 90° から 10° まで変化させた。

一例として、 $h/L_I=0.14$, $H_I/L_I=0.021$ としたときの反射板傾斜角 $\theta=90^\circ, 45^\circ, 20^\circ, 10^\circ$ についてのオシログラム上の波形記録を示すと図-6である。この場合には、 $\theta=30^\circ$ で板上での砕波が生じたから、 $\theta=20^\circ, 10^\circ$ ではもちろん激しい砕波が生じている。

反射率の算定にあたっては、定常状態以後の入射波に対する反射波の波高比を一波ごとに算出し、短周期のもので8波、長周期のもので6波の算術平均をもって反射率とした。波長は浅水波の場合の公式にしたがい、入射波高 H_I は採用波の平均値とした。

$h/L_I=0.107, 0.12, 0.14, 0.16$ のとき、波形勾配を

図-6 入射波および反射波の観測例
(実験 No. 3-4)

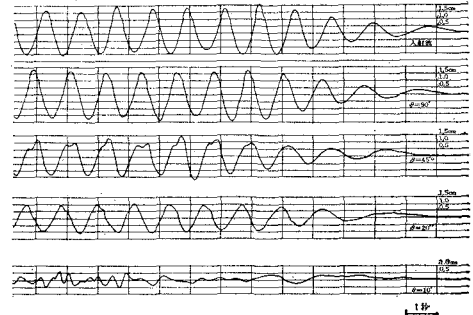


図-7 反射率におよぼすのり面勾配の影響

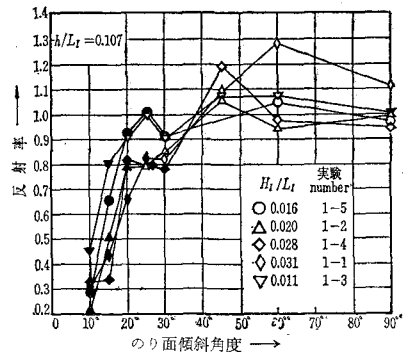


図-8 反射率におよぼすり面勾配の影響

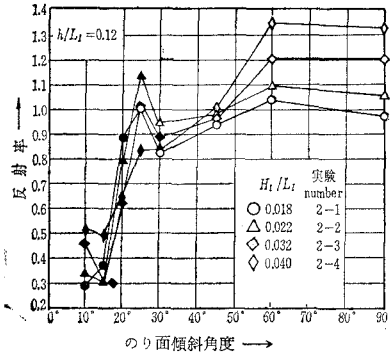


図-9 反射率におよぼすり面勾配の影響

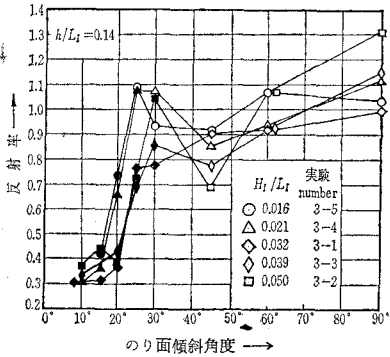


図-10 反射率におよぼすり面勾配の影響

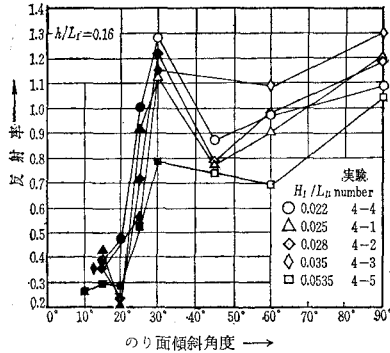
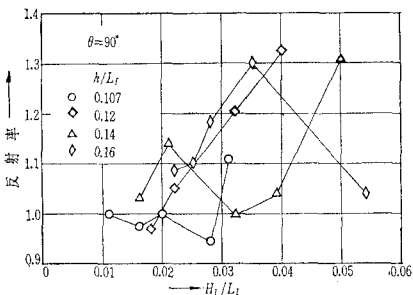


図-11 反射率におよぼす入射波波形勾配の影響



parameter にして整理したのが 図-7, 図-8, 図-9, 図-10 である。また反射板傾斜角を一定にして h/L_1 を parameter にして, 波形勾配 H_1/L_1 と反射率 R との関係を示したのが 図-11, 図-12, 図-13, 図-14 であ

図-12 反射率におよぼす入射波波形勾配の影響

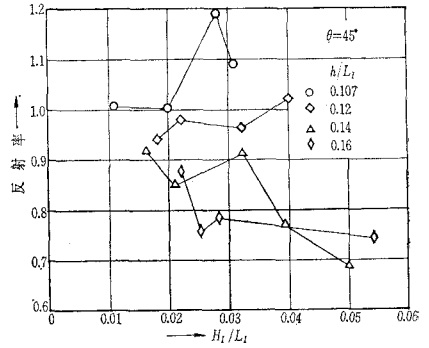


図-13 反射率におよぼす入射波波形勾配の影響

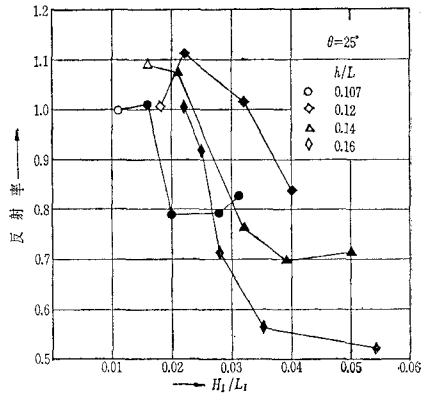
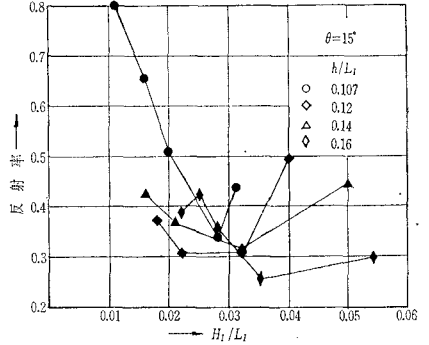


図-14 反射率におよぼす入射波波形勾配の影響



る。

図中, 黒く塗りつぶしてあるのが板上で碎波した場合を示している。

なお, 実験波の諸元を示すと 表-2 のようになる。

5. 実験結果の検討

図-6 に示した入射および反射波の観測波形の一例に見られるごとく斜面傾斜角が小さくなるにつれて反射波形は次第にくずれてくる。 θ が 60° 以下になると反射波の山が二つに割れはじめ, また $\theta = 20^\circ$ あるいは 10° のときの入射第一波に対応する反射第一波を見ればよくわかるように, 斜面に入射した波が斜面上をはい上るため

に、反射波自身は尾を引く現象を示し、はい上りによる残留部分が後続波に重なって、きわめて複雑な反射波形を示すものと思われる。

反射率 R とのり面勾配 θ および入射波波形勾配 H_I/L_I との関係について、Greslou-Mahe⁹⁾ の実験によると、のり面勾配一定の場合、反射率 R は波形勾配の大なるほど小さく、波形勾配一定の場合には、のり面勾配が小さくなるほど小である。式 (7) においても反射率 R と波形勾配 H_I/L_I が反比例関係にあることを示しており、われわれの実験でも図—13、図—14にこの傾向が認められる。ところが、式 (5) において反射率 $R' \leq 1$ であるからそのためには、入射波波形勾配 0.01 の場合でも式の適用はのり面傾斜角がせいぜい 20° 以下の場合に限られ十分傾斜角の小さいときにのみ成り立つ公式である。Healy の実験においてものり面勾配が $15^\circ \sim 16^\circ$ のときには Miche の理論値にかなりよくあっているが、それ以上のり面勾配が大になると不規則に理論曲線からずれるようである。Miche の式で、反射される最大波形勾配と傾斜角とが式 (4) のような関係にあるという論拠はわからないが、直感的に考えると波長を一定にして波高の異なる入射波がゆるやかな斜面にあたると波高の大小にかかわらず、激しく砕波して入射特性を失い、式 (4) のごとく傾斜角のみに左右されるような一定の反射波高に近づこうとするものと考えられる。このことは実験結果 図—7、図—8、図—9、図—10 で傾斜角の 10° 、 15° あたりの反射率が波形勾配に関係せず、一定の値に近く傾向があることから推定できる。図中で波長の等しいのは $h/L=0.107$ のとき実験 number 1-1、1-2、1-3 と 1-4、 $h/L=0.12$ のとき 2-1、2-2 と 2-3、 $h/L=0.14$ のとき 3-1、3-2、3-3 と 3-4、 $h/L=0.16$ のとき 4-1、4-2、4-3 と 4-4 である。もしこのことが実験的にさらにくわしく検証されれば反射率が入射波高に反比例するという Miche の理論式の裏づけとなり本実験の目的の一つである砕波エネルギーの見積りも可能となるだろう。

このようにわれわれの実験結果は砕波後ののり面勾配については Miche の理論式にも岩垣あるいは Greslou-Mahe の実験にもその傾向は比較的良好に合致するけれどものり面勾配が大なときに実験値のばらつきが大きく、とくに反射率が 1.0 をこえることがしばしばあるのはまことに不都合である。その原因として考えられるのは、まず入射波測定点は隔壁をこえて水路中心線に關し対称の位置の他の水路内にあり、それによって入射波を代表させているのであるから、微小ながら波形の相違、位相のずれが考えられる。反射板を水路から引き上げて両水路全く同じ条件で通過させる場合には、予備実験の図—5 で示したように波形、位相ともきわめてよくあっているが反射体を片側水路に挿入した場合は、たとえば左右水路の固有振動性も変わるはずであるから、完全

に同等な入射波群がえられているかどうか疑問である。しかしこのことを実験的に検証する手段はない。反射体を入れない場合でも 図—5 のような結果はまれであり、全く同じ条件でくり返しても回路にかなりの非平衡電流を生じ、測定開始に先だって最も苦心したことの一つである。波高の絶対値が小さいために、この非平衡値あるいは波高測定値にわずかの誤差があっても反射率に大きな影響をおよぼす。また、左右の位相差については鉛直壁の反射率が通常いわれているように波形勾配の小さいほど大きくはならず 図—8、図—9 のように逆の状態の場合があるのは、波形勾配が大になればなるほど当然少しの位相差でも大きな波高差を生じることから、あるいは左右水路でわずかの位相のずれが生じているのではないとも考えられる。発生波波形は 図—5 にみるように crest 部分が鋭く trough 部分が偏平なトロコイド波形に近いから波形勾配が大になるほど位相差による誤差は顕著になろう。

$h/L_I=0.107$ のときの図—7 が他の結果にくらべ比較的滑らかな曲線を描いているのは、波形勾配が 0.02 以下のものが多いためであり、波形勾配が 0.02 以下のものについては、他の図においても $\theta=90^\circ \sim 60^\circ$ の場合の反射率は、1.0 にきわめて近い。

つぎに、合成波測定位置は反射板が垂直のときにその前面約 20 cm の所であり、波高計位置は変わらないから反射板を傾斜させた場合は、汀線から測点までの位置は相対的に変化する。合成波の波形記録をみると同一波長のものについては、 $\theta=90^\circ$ のときは上記波高計位置からもわかるように部分重複波の腹に近く、したがって波形の時間的な変化量が大きく、反射板を傾斜していくにつれて漸次小さくなり、 45° 付近を最低にして再び大きくなり出し、ちょうど $25^\circ \sim 30^\circ$ 付近でまた極値をとっている。波高計設置位置を合成波で最小波高を示す位置付近にすれば時間的な変化が小さいので都合がよいが、種々の波を用いるので実際には不可能である。

実験値の散乱はたとえ Healy の方法で行なっても 20% 程度は十分出るのであるから、やむをえぬとはいえないものの、100% をこえる反射率はなんとしても不都合である。この点については上記の諸問題を逐一解決して除去したいと考えている。

さて、図—7 から図—10 を通じて明確に認められる顕著な特性は、斜面傾斜角が $25^\circ \sim 30^\circ$ あたりで反射率が異常に大きくなることである。その理由は現在よくわかっていないがこのあたりが斜面上で砕けるか砕けないかの限界傾斜角に近いので、そうした遷移状態がなんらかの形で反射波に影響しているのではないかと想像している。あるいは斜面上をはい上る稀薄波の back-wash が後続する波と干渉することと考えられるので、今後は斜面上の砕波機構と関連させて反射の問題を追究して行き

たい。

本研究は文部省科学研究費，および運輸省第三港湾局の調査費を受けて行なったものであり，実験および整理にあたっては当研究室大学院学生仙波淳君の熱心な協力を得，学部学生青島行男，中井伸洋の両君にも手伝っていただいた。以上を付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Kato, Y., Suzuki, Z., Nakamura, K., Takagi, A., Emura, K., Ito, M., and Ishida, H.: The Chile Tsunami of May 24, 1960 Observed along the Sanriku Coast, Japan, RECENT STUDIES ON TSUNAMI

RUN-UP II, U.S-JAPAN COOPERATIVE SCIENTIFIC RESEARCH SEMINARS ON TSUNAMI RUN-UP, April 18-24, 1965 Sapporo, Tokyo.

- 2) 尾崎 晃：消波構造論，水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会水理委員会，1965.
- 3) 岩垣雄一：海岸堤防論，水工学シリーズ，土木学会水理委員会，1964.
- 4) Straub, L.G., C.E. Bowers and J.B. Herbich: Laboratory Tests of Permeable Wave Absorbers, Proc. of 6th Conf. on Coastal Engineering, 1958, p. 729~742.
- 5) 水理公式集，昭和38年増補改訂版，p. 478，土木学会，昭和38年.