

反射実験における波の相互干渉

岩 垣 雄 一*・木 村 晃**

1. 緒 言

従来、規則波の反射に関しては、Healy や Greslou-Mahe の研究を初めとして、数多くの研究がある。研究の主題を特に反射に限らない場合でも、波と構造物の相互干渉を取扱うときには、波の反射を無視して論議を進めることはできない。このため、各種の特性を持つ規則波に対し、いろいろな形状の構造物を対象として、その反射率を測定する実験的研究が行なわれ、大きな成果をあげてきた。しかし、実験によって求められる反射率は、それを図上に点描すると、非常に散乱し、波の特性や、構造物の形状を固定しても、幅広い測定値が得られるために、真の反射率を求めることがむずかしい。このようなことから、近年になって、波の反射率を正確に求めようとする試みが行なわれるようになった。その1つは、引算回路を利用し、重複波から反射波を取り出して、反射率を求めようとしたものであり、他の1つは、有限振幅波の反射率を求める際、Healy の方法を用いると、見かけ上真の反射率よりも小さな反射率が求められることを理論的に明らかにし、反射率の修正図を作成したものである。

最近になって、わが国においても不規則波発生機が試作され、これを用いてランダム波に伴う諸問題が研究されるようになってきた。しかし、前述のように、実験値の散乱を生ぜしめる原因の究明など、反射に関しては、ランダム波をとりあげる前に、解決すべき問題がまだあるように考えられる。そこでランダム波の反射の研究を行なう前の段階として、2成分もしくは数成分の規則波をかさねあわせた合成波を用いて、実験値の散乱の原因を究明しつつ、反射実験を試みることにした。このような合成波は、規則波とランダム波の中間的な特性を持ち、成分波の数と、成分波の波高や周期を変化させることにより、いろいろな不規則合成波を作り出すことができる。この合成波を鉛直で滑らかな反射板を用いて反射実験を行なったところ、規則波以上に、各成分波の反射率がばらつくことがわかった。この研究はこうした反射実験に際して、反射率の値を散乱させる原因について検討するとともに、合成波の反射率測定値のばらつきを示

して、その最大の原因が波の相互干渉にあるのではないかという理由を述べるとともに、合成波の反射実験の困難さを示したものである。

2. 反射実験における問題点

(1) 反射率の計測法

波の反射率を求める方法として、従来より Healy¹⁾の方法が広く用いられてきた。しかし、この方法によって真の反射率が求められるのは、入射波および反射波が微小振幅波とみなされる場合に限られる。合田・阿部²⁾はこの Healy の方法を有限振幅波に対して用いた場合に発生する誤差について研究し、Healy の方法を用いて得られる見かけの反射率から、真の反射率を求める修正図を与えた。室田・山田³⁾および長尾・加藤⁴⁾は重複波から電氣的に入射波を差引いて、反射波を直接取り出して反射率を求める方法を試みた。すなわち、水槽を2等分し、一方の水槽に反射板を設置し、両方の水槽の水位記録から、引算回路を通じて電氣的に反射波をとり出そうとするものである。しかしこの方法の欠点は、両水槽の波の位相が完全に一致していない場合には、次のように、取り出される見かけ上の反射波の振幅は、真の反射波より大きくなるということである。すなわち、完全反射すると仮定すれば、反射板の前面で測定される水位変化は、入射波水槽での水位変化を

$$\eta_i = a \cos 2\pi ft \dots\dots\dots (1)$$

とし、重複波水槽において θ だけ位相がずれると、

$$\eta_s = 2a \cos (2\pi ft + \theta) \dots\dots\dots (2)$$

で表わされるから、引算回路によって取り出される見かけ上の反射波は

$$\eta_s - \eta_i = a\sqrt{5-4\cos\theta} \sin (2\pi ft + \alpha) \dots\dots (3)$$

となるので、見かけ上の反射率は

$$R = \sqrt{5-4\cos\theta} \dots\dots\dots (4)$$

となる。したがって $\theta=0$ の時は $R=1.0$ となるが、 $\theta=\pi/2$ になると $R=\sqrt{5}$ となって反射率が 1.0 より大きくなる。今回の実験のように、合成波の反射実験を行なうにあたっては、反射率の計測方法の決定は実験結果の精度に大きな影響を与えるものと考えられる。Healy の方法は成分波の数が少ない場合には、その適用は不可能でないと思われるが、成分波の数が増加すると果たしてうまくゆくかどうか疑問であり、一般的ではない。ま

*正会員 工博 京都大学教授 工学部

**正会員 工修 京都大学助手 工学部

た、引算回路については、次節で述べるように、入射波と反射波が重複した場合、成分波の波速が変化し、2つに分離した入射波水槽と反射波水槽で、相互の波の位相に差ができるため、この方法で反射波を分離しようとするのは適当でない。したがって今回の実験では、後述するような別の方法を用いた。

(2) 波の非線型干渉

今回の合成波の反射実験において、波が重複した場合、波の周波数が変化するという現象が見られたが、波そのものは、発生機によって規則的に発生させるわけであるから、周波数の変化は重複した波相互の干渉による波速の変化に対応する見かけ上のものであると考えられる。この研究については、Longuet-Higgins と Phillips⁵⁾ および合田・阿部⁶⁾ の波の非線型干渉に関する研究がある。Longuet-Higgins と Phillips の研究は、深海波を対象としたものであり、著者らが用いた浅海波に彼らの研究をそのまま適用することはできないが、大いに参考になる。Longuet-Higgins と Phillips の研究によれば、進行方向が同じでも、あるいは逆方向でも、2波がかさなりあうと、波速が変化する。この波速の変化は、水位記録を、固定した水位計で計測した場合には、周波数が変化しているように見える。このように、2つもしくはそれ以上の波がかさなりあうと、成分波の周波数が見かけ上変化することが理論的にも明らかにされている。このような周波数の変化は、次に述べる解析の段階で決定的な障害となる。

(3) 解析にともなう問題

波の周波数が時間的に変化したり、未知であると、従来用いられているフーリエ解析法では、分解する周波数の間隔が、記録の長さ、サンプリング間隔で一義的に決定され、記録されている波の周波数が一定で、分解すべき周波数と完全に一致しない限り正確な周波数および波高を知ることができない。このため、今回のような合成波の解析においては、スペクトルピークが出ると考えられる付近を、非常に小さな周波数間隔でフーリエ解析する必要があるし、また、周波数が時間的に変化すると、正確な成分波の振幅を分解することができないという問題がある。

3. 合成波の反射実験

(1) 実験装置および実験方法

実験に用いた水槽は、長さ約 30 m、幅 50 cm、高さ 70 cm の両面ガラス張りである。この水槽の一端には、油圧によって最大 8 個の単振動を重ねあわせることのできる、ピストン形式の合成波発生装置が設置してある⁷⁾。一方、他端には、1/3 勾配のアルミ製斜面の上にステラシートを張って消波工とし、ここに到達した波はほぼ完全に消波されるようにした。水深は実験を通じて 30 cm

表—1 実験に用いた成分波の諸特性

No.	Wave Index	周期 (sec)	周波数 (Hz)	波長 (m)	波高 (cm)
1	7-100	2.500	0.400	4.167	3.20
	7- 80	"	"	"	2.30
	7- 60	"	"	"	1.83
2	6-100	1.762	0.567	2.830	3.91
	6- 80	"	"	"	2.86
	6- 60	"	"	"	2.10
3	5-120	1.251	0.799	1.863	3.91
	5- 80	"	"	"	2.00
	5- 60	"	"	"	1.55
4	4-100	0.884	1.131	1.136	4.75
	4- 80	"	"	"	3.63
	4- 60	"	"	"	2.69

に保った。実験波の諸特性は表—1 に示している。合成波の反射実験においては、成分波の波速がそれぞれ異なり、反射板に到達するのに要する時間に差がある。反射板を設置した点において、定常に達した合成波を用いて実験を行なうために、実験を次に述べるような2通りの方法で行なった。

A) 造波機より 20 m の点に、幅 50 cm、高さ 70 cm、厚さ 3 mm の鉛直方向に可動のアルミ製反射板を設置した。そしてこの反射板の前面に電気抵抗線式波高計を置き、水位を計測した。まず、あらかじめ反射板を引上げておき、各成分波が定常になったと考えられる時刻より 30 sec の波の記録を入射波の水位記録とした。次に、反射板を降ろし、その後約 20 sec 間の記録を重複波の水位記録とし、それを解析に用いた。

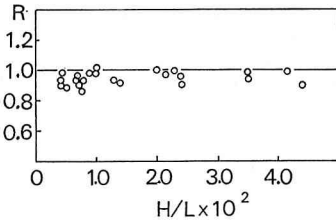
B) 長さ 20 m、高さ 50 cm、厚さ 3 mm のアルミ製仕切り板で水槽を縦断方向に2等分し、一方を入射波測定用水槽、他方を反射波測定用水槽とした。反射波測定用水槽には造波機より 20 m の点に、A) の場合と同様、幅 25 cm、高さ 70 cm、厚さ 5 mm の鉛直方向に可動の塩化ビニール製反射板を設置した。この反射板の前面と、仕切り板に対して対称な入射波測定用水槽の対応点に1台ずつ電気抵抗線式波高計を置き、それぞれの水位を計測した。あらかじめ反射板を引上げておき、十分定常に達していると考えられる時より約 30 sec 後に反射板をおろし、両水槽の水位変化を測定し、それぞれ入射波および重複波の水位記録とした。

(2) 解析方法

解析は水位記録をデータレコーダーおよび A-D 変換器を用いてデジタル化し、フーリエ解析を行ない、各成分波の振幅および周波数を求めて、その後の解析に用いた。

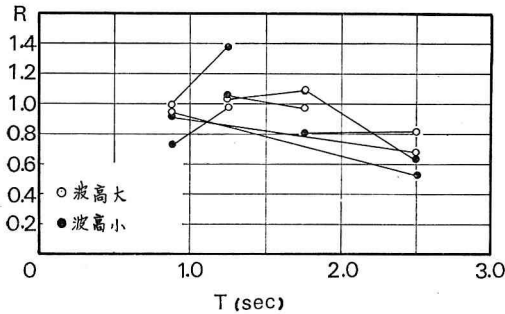
(3) 実験値の解析結果

図—1 は A) の方法で行なった規則波の反射実験の結果で、反射率 R を入射波の波形勾配に対して点描してある。この図より明かなように、実験値は多少のばらつきはあるが、ほぼ 1.0 もしくはそれより若干小さな値

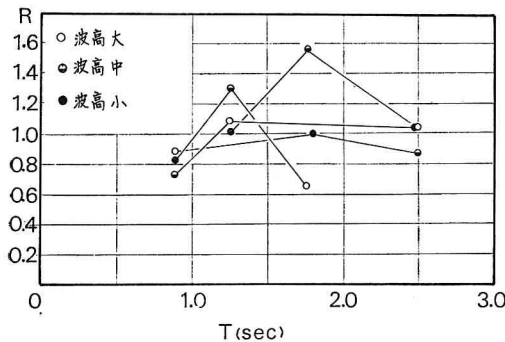


図一 規則波の反射率

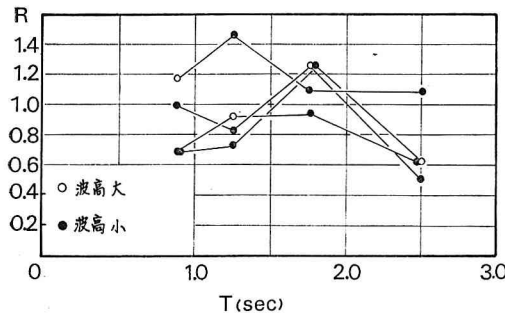
を示しており、鉛直で滑らかな反射板による反射率としては、ほぼ妥当な値である。規則波の場合は、波の相互干渉のために、周波数変化があっても、フーリエ解析を行なう必要がないので、今回用いた方法で反射率を求めることに問題はない。図一2, 3, 4 は A) の方法で実施



図二 合成波に含まれる成分波の反射率 (2 成分の場合)



図三 合成波に含まれる成分波の反射率 (3 成分の場合)



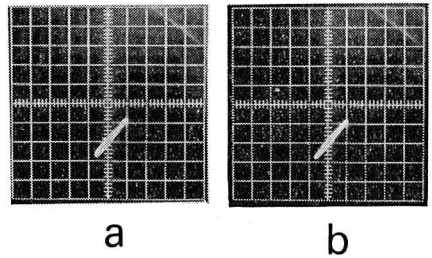
図四 合成波に含まれる成分波の反射率 (4 成分の場合)

した合成波の反射実験の結果を示したもので、図一2 は 2 成分、図一3 は 3 成分、図一4 は 4 成分の合成波に含まれる各成分波の反射率 R を周期 T に対してプロットしたものである。図中において組み合わせた各成分波は、互いに直線で結んである。また図中の丸印は表一に示したように、各ピストンの 3 段階の大・中・小の波高に対応するものである。これらの図より明かなように、図一1 に比して反射率のばらつきは非常に大きい。

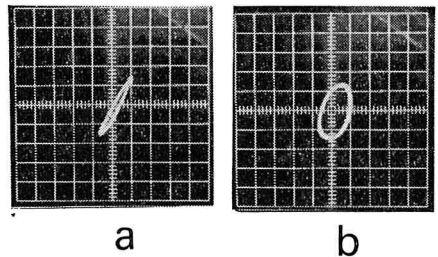
4. 反射にともなう波の干渉

(1) 規則波の干渉

2. の (2) で述べたように、波が重複すると、それぞれの成分波の波速が変化することが理論的に明らかにされた。波速が変化すると、見かけ上周波数が変化する。写真一1, 2 は B) の方法で求めた表一の 4—100 で示

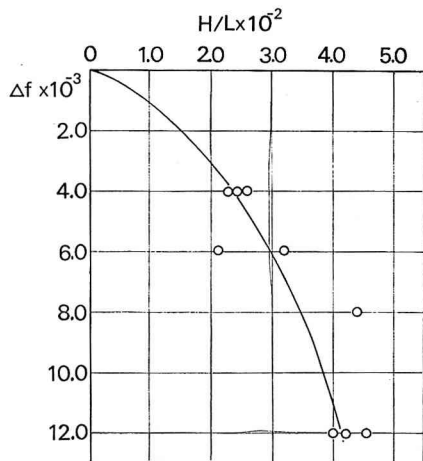


写真一 規則波のリサージュ図 (反射板なし)



写真二 規則波のリサージュ図 (反射板あり)

した規則波に対するオッシロ写真で、垂直入力として反射波水槽の水位、水平入力として入射波水槽の水位をとり、ブラウン管上にリサージュ図を描かせたものである。写真一1 (a) は反射板を入れない状態、写真一1 (b) はその 20 sec 後の同じ状態の写真である。写真一2 (a) は反射板を入れた直後のリサージュ図であり、写真一2 (b) はやはり 20 sec 後の同じ状態の写真であるが、写真一1 より明かなように、反射板を入れない状態では、20 sec 経過後でも両水槽での波の位相は一致し、ずれていないことがわかる。しかし、写真一2 からわかるように、反射板を入れたら、20 sec 後には両水槽の波の位相は、ほぼ $\pi/2$ だけずれていることがわかる。この両水槽の水位記録を注意深くフーリエ解析した結果を示したものが図一5 である。縦軸には入射波と重複波

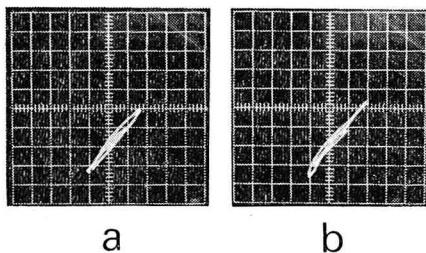
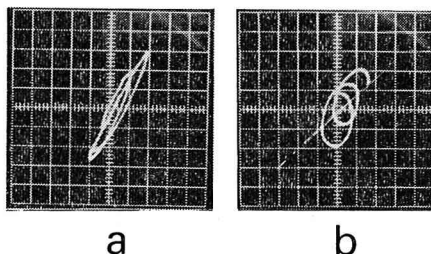


図—5 規則波の周波数変化

の周波数の差 $4f$ を、横軸に波形勾配 H/L をとって示してある。実験に用いた波は表—1 の No. 4 に示した周期 0.88 sec の波である。図—5 よりわかるように、波形勾配が増大するにつれて、周波数のずれが大きくなる傾向がある。

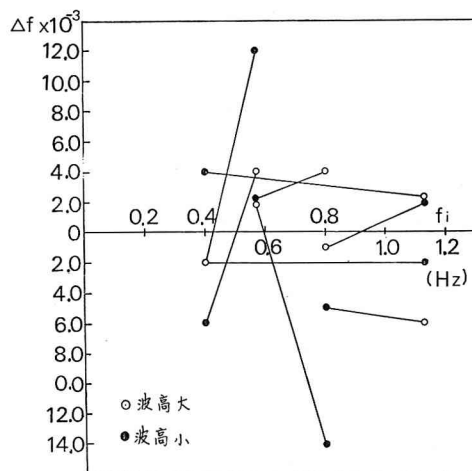
(2) 合成波の干渉

合成波の反射実験においても、規則波の場合と同様、見かけ上の周波数のずれが観察された。写真—3, 4 は写真—1, 2 と全く同じ手順で 4 成分の合成波について、リ

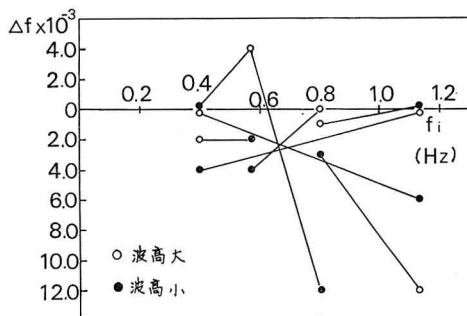
写真—3 合成波のリサージュ図
(反射板なし)写真—4 合成波のリサージュ図
(反射板あり)

サージュ図を描かせたものである。写真—3 により、反射板を入れない状態では、両水槽の合成波の位相はほとんど差がなく、ほぼ勾配が 1.0 の直線になっている。しかし反射板を入ると、写真—4 (b) により明らかなように、両水槽の波の位相には大きな差がみられる。波の

非線型干渉による周波数の変化は、入射合成波についてもいえるのであって、図—6 はこの例を示している。すなわち、この図は (A) の方法で行なった 2 成分の合成波の入射波について解析したもので、縦軸として規則波の周波数 f_i と合成波に含まれる同じ成分波の周波数の差 $4f$ をとり、横軸は f_i をとって点描した。また図—7 は 2 成分合成波の重複波に含まれる成分波の周波数と規則波の重複波の周波数 f_s との差 $4f$ について f_s に対して点描したものである。合成波が反射した場合、その中に含まれる成分波の相互干渉は次に示す 3 種の干渉がおこっていると考えられる。(1) 同じ方向に向う異なる成分波相互の干渉、(2) 逆方向に向う異なる成分波相互の干渉、(3) 同じ成分波の入射波と反射波の干渉。したがって反射板前面で水位を記録する限りでは、(1)と(2)による周波数変化は互いに打ち消しあい、合成重複波の水位記録からは、(3) による周波数変化だけがとり出されるはずである。図—7 において、波相互の干渉が定常なものであれば、周波数の時間的変化はなく、図中の各点は $4f=0$ の直線上に乗るはずのものである。図をみると $4f$ は負の側の値が多いが、これは反射板を降ろした後、反射波と入射波とが干渉し波速が減少し始めているが、まだ定常にならず負の側に出たものと考えられ



図—6 成分波の周波数の変化 (入射波)



図—7 成分波の周波数の変化 (重複波)

る。

5. 結 語

合成波を発生させ、この波を鉛直で滑らかな反射板により反射させる実験を行ない、その過程において見られる波の非線型干渉について述べてきた。その結果次のようなことが明らかになった。

(1) 波の干渉により、その成分波の波速が変化するため、見かけ上周波数が変化するという Longuet-Higgins と Phillips および合田・阿部の理論の裏付がある程度できた。

(2) 反射板を降して重複波の水位を記録すると、入射波と反射波の干渉によって、周波数が時間的に変化することが見出された。

(3) (2) のような、周波数が時間的に変化するような場合には、この記録をフーリエ解析しても、真の波高、周波数を得ることができない。

(4) 水槽を2等分し、引算回路を用いて反射実験を行なう場合は、(1) の波速の変化により両水槽の波の位相に差が出てくるため、反射波をとり出すことができない。

以上のように、主として波の干渉による見かけ上の周波数変化にともなう諸問題について述べてきた。このような反射実験においては、水位記録を従来のフーリエ解

析法により解析するのであれば、真の波高、周期を求めることができないということがわかった。したがって別の解析法を見出さなければこの研究は進展しないことになる。今後不規則波を用いた研究が増加すると考えられるが、特にこの点に留意して研究を進める必要があると思われる。

最後に、この研究に協力していただいた京都大学大学院学生 千田哲雄君に対して謝意を表すとともに、この研究は文部省一般研究費による研究の一部であることを明記する。

参 考 文 献

- 1) Healy, J.J. : Wave damping effect of beaches, Proc. Minnesota International Hydraulic Convention, pp. 213-220, 1953.
- 2) 合田良実・阿部淑輝 : 有限振幅波の部分反射に伴う見かけの反射率について、港湾技術研究所報告, 第7巻第3号, pp. 1-53, 1968.
- 3) 室田 明・山田哲二 : 反射に関する基礎的研究, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 8-14, 1966.
- 4) 長尾義三・加藤久徳 : 直立消波岸壁に関する二、三の実験的研究, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 145-154, 1970.
- 5) Longuet-Higgins, M.S. and Phillips, O.M. : Phase-velocity effects in tertiary wave interactions, J. Fluid Mech., 12, pp. 333-336, 1962.
- 6) 合田良実・阿部淑輝 : 前出の書 2)
- 7) 岩垣雄一・石田 昭 : 波起機によっておこした不規則波の特性, 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 29-34, 1968.