

波数周波数スペクトルによる風波の反射率測定

石 田 昭*・岡 本 泰 臣**・古 田 正 勝***

1. 緒 言

風波のようなランダム波の反射現象においては水位変動のスペクトル構造に ripple と呼ばれる小さな波形が現われ、この波形の振幅を計れば反射率を周波数の関数として求めることが可能である。しかし浅水領域における反射現象ではうまく ripple だけを取り出すことができなくて、反射率の測定精度が悪くなる。また陸に向かって吹く強風の影響下においては、反射波は風に逆らって進むのでかなりのエネルギーが減衰するであろうことが光易ら^{1),2)}によって示唆されているが、砕波現象とか吹送流などを含んだかなり複雑な現象 となることが想像される。本研究はこのような条件下での反射現象を適確に把握するために波数周波数スペクトルによって精度のよい反射率測定を行ない、反射機構を解明しようとしたものである。

2. 実験方法

実験に使用した風洞水槽は幅 60 cm、高さ 120 cm、有効フェッチ約 20m の両面ガラス張り水槽で、風波の波数周波数スペクトル解析に使用したもの³⁾と同じである。風下端から約 6 m の範囲の水底を 20 cm だけ高くして浅水領域を作り、約 1m の長さの斜面で沖側の水底と接続させた。実験条件と解析条件は表一1に示すとおりであるが、データ No. に i が付くのは風下端部に砂利を敷いて反射波をなくしたもので、z が付くのは高さ 35 cm の垂直反射壁を設置したものであることを表わし

表一1 実験条件および解析条件

Data No.	水 深 (cm)	風 速 (m/sec)	反射壁	Δx (cm)	Δt (sec)	空間サンブル数	時間サンブル数
1-i	20	11.2	無	5	0.15	111	119
1-z	20	11.2	有	5	0.15	107	102
2-i	20	7.8	無	5	0.15	109	128
2-z	20	7.8	有	5	0.15	107	101
3-i	10	11.2	無	5	0.15	104	121
3-z	10	11.2	有	5	0.15	105	110

* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 本州四国連絡橋公団
*** 正会員 工修 岐阜県土木部

ている。
時空間波形 $\eta(t, x)$ を得るために、2 台のストロボスコープ（閃光間隔 $\Delta t=0.15$ sec, 閃光時間 $22 \mu\text{sec}$ ）を水槽の片側に配置し、反対側から 2 台のカメラでスリット撮影した。この方法はまず、ネガフィルムの露光部分が一コマの対角線上の約 3 mm 幅の部分となるようにカメラの裏蓋を開けてセルロイド製スリットを貼り付ける。次にレンズにキャップをしたままでシャッターを押しながら続けて撮影済の状態にする。実験室内を真暗にして、シャッターを開放にした 2 台のカメラのフィルムを同時に一定速度で巻き戻し始める。2～3 秒後に同期させた 2 台のストロボスコープのスイッチを on にする。こうすれば撮影された左右のカメラの画面についても同期をとることができる。これだけのことであるが、光の当て方、巻き戻しの速度（画面がダブらないように、かつフィルムに空白がないようにする）、カメラの設置方法などに熟練を必要とし、実験スタッフの呼吸が合わないとい満足のゆく画面は得られない。ストロボスコープの光はどうしても中央が強く、両端で弱くなるので一様の強さで光を当てる工夫が必要である。またフィルムはコダックのトライ X がよいようである。こうして得られたネガフィルムをポジフィルムに反転し、プロジェクターで拡大して読み取りを行なった。読み取り画面は実寸の約半分にした。図一1 は横軸に時間、縦軸に距離をとって $\eta(t, x)$ を示したもので、平均水面から 2 cm 以上を黒く塗って示してある。(a) 図 (Data No. 1-i) は反射壁のない場合であり、波形がかなり長く保存されたまま進行する様子がわかる。(b) 図 (Data No. 1-z) は同じ条件で図の下端に相当する部分に反射壁を設置した場合である。反射壁から反射して行く逆行波の存在が認められる。また反射波と入射波が重複するために波形が保存される時間が非常に短いことがわかる。反射壁直前は常に腹になっているが、少し離れると腹と節の関係が変化するようにである。分散値を $\bar{\eta}^2(t, x)$ として算出すると (a) 図では 4.74, (b) 図では 3.08 となり、反射波が存在する場合の方が小さくなっている。この原因は周波数スペクトルを算出するとはっきりとする。

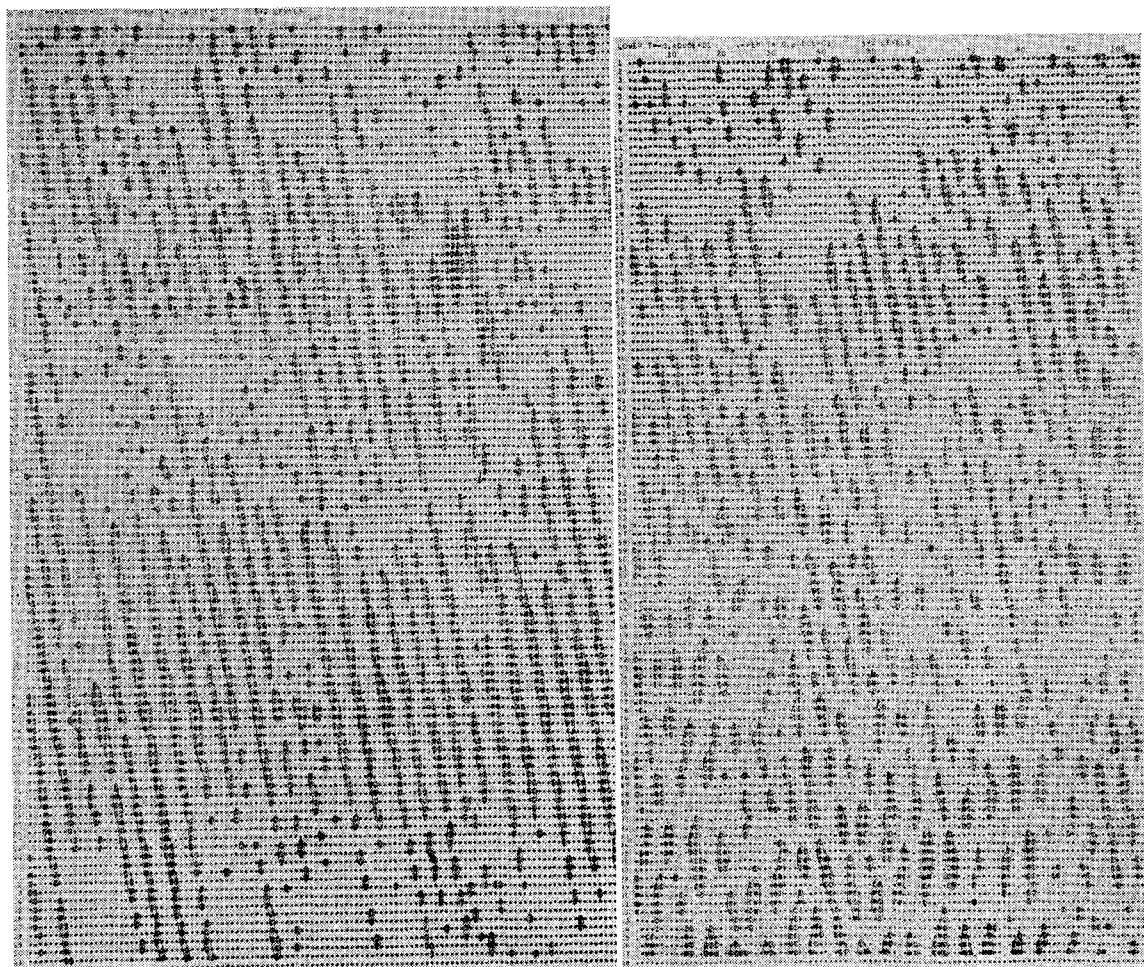


図-1 (a) 反射波のない場合の時空間波形の等高線表示 図-1 (b) 反射波がある場合の時空間波形の等高線表示

3. 解析方法

波数周波数スペクトルを算出する方法として二次元相関関数を重フーリエ変換する方法³⁾とFFTによる方法が考えられる。今回は読取り個数が増加しているので計算速度の速いFFTによって求めた。具体的には名大計算センターの図形処理サブルーチンSLIPの中にあるFTR20とOOPA20を利用し、離散化した $\eta(t, x)$ の x 方向 t 方向ともに128個に満たない部分に0を入れた。両サブルーチンをCALLすると振幅スペクトル密度が得られるのでこれにFILTERをCALLして平滑化($3 \times 3 = 9$ 個の単純平均)し、最後にone sideで定義した波数周波数パワースペクトル密度に直した。FFTは分解能が高いので相関関数法によるものより当然 $E_{\max}$ の値が大きくなる傾向があるが全体のスペクトル構造は両方の計算法で一致していた。なお、図-1は同じくSLIPの中のDISP1Rを、図-2~図-4はDISP6RをCALLして得た図形出力の上に書き加えたものである。

4. 波数周波数スペクトル

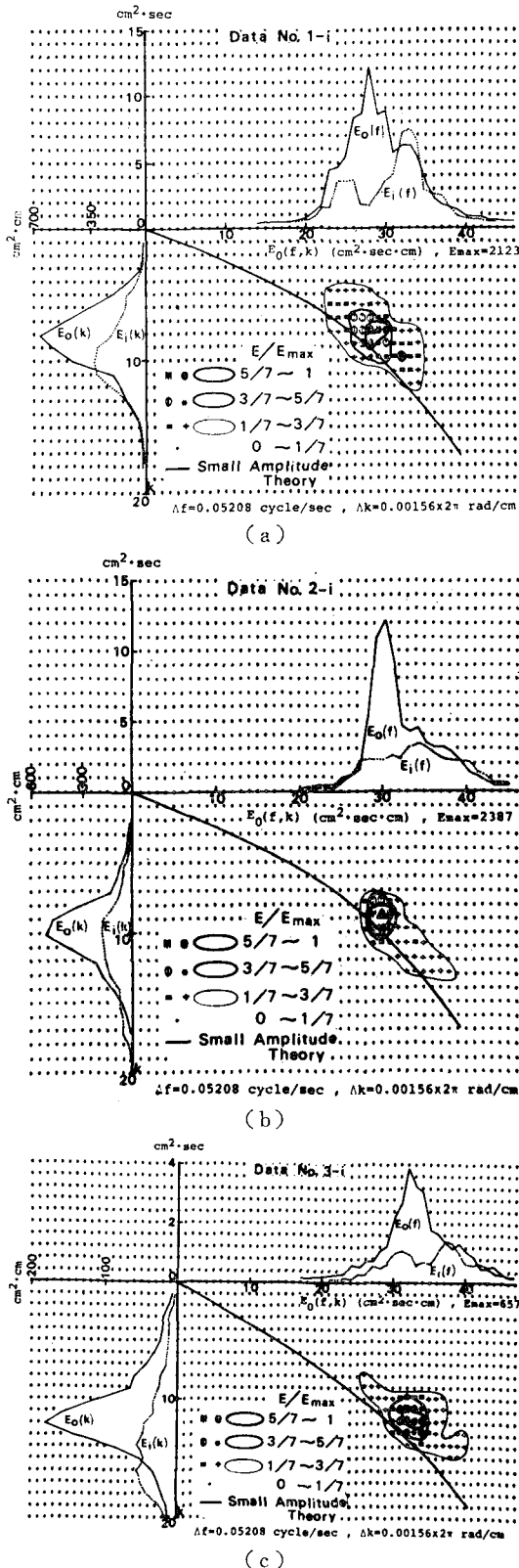
(1) 反射の無い場合

図-2(a)~(c)の第4象限は反射壁を置かない場合の波数周波数スペクトル $E_0(f, k)$ を等値線で示したもので、一番低いレベルの等値線でも最大エネルギーとの比率 $E/E_{\max}$ が1/7(振幅でいえば約38%)を示しており、エネルギーがかなり幅広く分布する様子は前報³⁾と同じ傾向である。またどの場合も微小振幅波理論による分散関係式より高周波数側に最大値(Δ 印で示す)が存在するがこのことは後で考察する。第1象限、第3象限の実線 $E_0(f)$ 、 $E_0(k)$ は波数周波数スペクトルをそれぞれの軸に添って加算したもので次式によって求めた。

$$E_0(f) = \sum_{k=0}^{1/2\Delta x} E_0(f, k) \Delta k \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_0(k) = \sum_{f=0}^{1/2\Delta t} E_0(f, k) \Delta f \quad \dots\dots\dots (2)$$

点線の $E_i(f)$ 、 $E_i(k)$ は次に述べる反射がある場合の



図—2 反射波がない場合の波数周波数スペクトルの等値線表示

スペクトルを同様に加算したもので、入射波成分だけを加算している。この図により、反射があると、入射波そのものの最大エネルギー成分が急激に減少し、 $E_i(f)$ 、 $E_i(k)$ ともにピークの位置が変化することがわかる。

(2) 反射がある場合

図—3 (a)~(c) の第4象限は反射壁を置いた場合の波数周波数スペクトルの入射成分 $E_i(f, k)$ を等値線で示したもので、第3象限のマイナス周波数成分は反射成分 $E_r(f, k)$ を表わしている。図—2 と比較すると反射がない場合のピーク ($E_0(f, k)$ のピーク) は、反射が存在するとかなり小さなピークとなり、波数は No. 1 が変化せず、No. 2 が Δk 減少、No. 3 が Δk 増加というように一定していないが、周波数を見ると、No. 1 が $3\Delta f$ 、No. 2 が $3\Delta f$ 、No. 3 が Δf とすべて減少しており、波速が小さくなることを示している。これは反射波の影響で吹送流が減少すること一つの原因として考えられる。一方反射成分 $E_r(f, k)$ の方は主なピークが一つで、このピークは $E_0(f, k)$ のピークの波数とはほぼ一致している。ただし周波数の絶対値は吹送流がなくなるせいか、すべての場合に $E_0(f, k)$ より低周波数側に移行して微小振幅波理論に一致している。最も興味深いのは入射成分 $E_i(f, k)$ の最大ピークが、 $E_0(f, k)$ のピークより高波数側にあることである。水深 20 cm の No. 1 と No. 2 では $3\Delta k$ 、水深 10 cm の No. 3 では $5\Delta k$ 増えた所にある。これは $E_0(f, k)$ のピーク成分が反射して碎波（風の影響が大であろう）を起すために発生するもので、自由波としての性質を持っているようである。図中の $E_i(f)$ 、 $E_i(k)$ は図—2 の点線と同じものであり、 $E_r(f)$ 、 $E_r(k)$ は反射成分だけを加算したものである。反射がある場合の入射成分 $E_i(f, k)$ に複数個のピークが出現するために k 方向に加算した $E_i(f)$ と $E_r(f)$ にも複数個のピークが現われる。しかし f 方向に加算した $E_i(k)$ 、 $E_r(k)$ は単純な形をしているので、平均的にみた反射率を算出するには $E_r(k)/E_i(k)$ を利用した方がばらつきが少ない。

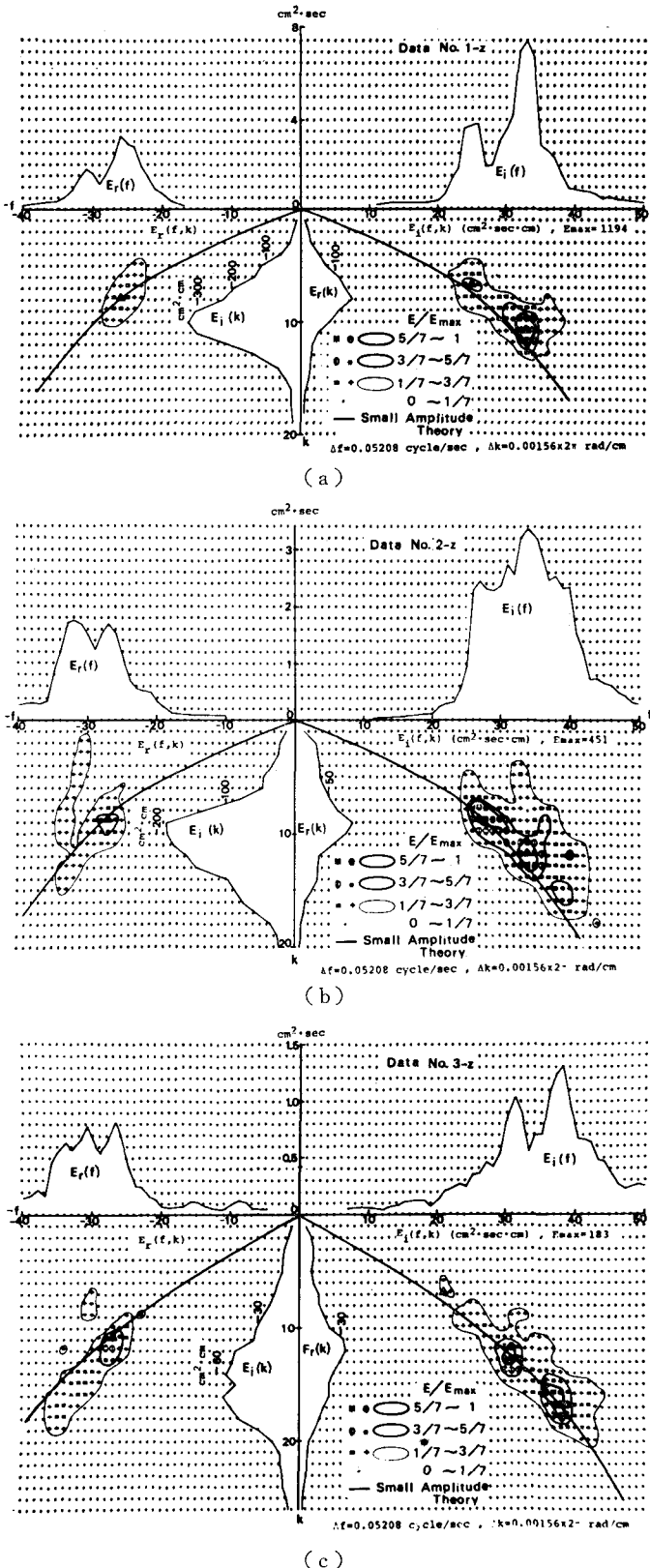
5. 反射率の特性

(1) 波数周波数特性

図—4 (a)~(c) の右側は反射がある場合の波数周波数スペクトルから反射波成分 $E_r(f, k)$ と入射波成分 $E_i(f, k)$ との比をとって示した反射率の2乗値である。

$$r^2(f, k) = E_r(f, k) / E_i(f, k) \quad (3)$$

図—3 に示した $E/E_{\text{max}}=1/7$ の等値線の中については r^2 が 0.4 以下、0.4 から 0.8 まで、0.8 以上で分けて示してある。式 (3) の定義による反射率は周波数を固定して考えると高波数成分ほど高く、波数を固定して考えると低周波数ほど高いという傾向がある。また一般



図—3 反射波がある場合の波数周波数スペクトルの等値線表示

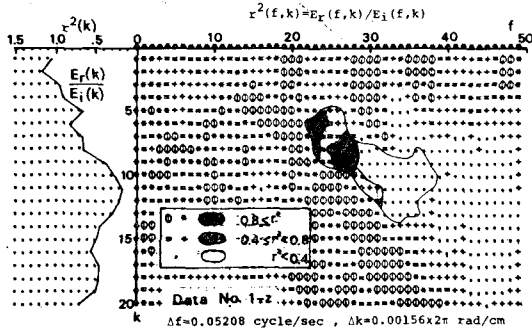
に入射波のピークの位置よりも若干低波数側か高波数側に高い反射率を示す部分がある。同図の左側には波数スペクトルの比 $E_r(k)/E_i(f)$ として定義した平均的反射率を示してある。周波数スペクトルの比 $E_r(f)/E_i(f)$ による定義よりもばらつきが少なく、いずれの場合も $E_i(f, k)$ のピーク波数でエネルギー比が 2~3 割の値になっており、それより低波数側に向って大きくなっている。

(2) 入射率と反射率

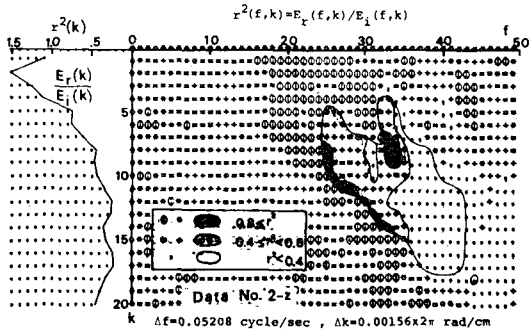
以上より、 $E_0(f, k)$ に含まれる波のエネルギーは風によって助長されるであろう重複波の碎波現象によって大きなエネルギーを消散し、入射波の全エネルギーが反射壁まで進入できないことがわかるので、入射率を $E_i(k)/E_0(k)$ として定義した。また反射率も $E_r(k)/E_0(k)$ によって定義したものをしらべてみた。図—5 は入射率を示したもので横軸は $E_0(f, k)$ のピーク波数 k_p で規準化したものである。入射率は $k=k_p$ 付近が一番低く、これより低波数側では同一水深 (No. 1 と No. 2) だと風速が大きいほど低く、同一風速 (No. 1 と No. 3) だと水深が浅い方が低い。高波数側の入射率はいずれの場合も高くなる。図—6 は反射率を示したもので、入射率と同じく $k=k_p$ 付近で小さな値である。低波数側は入射率と同じ傾向であるが、高波数側になると水深が浅いと急に反射率が高くなっている。なお、図—4 の左側に示した反射率も k_p を $E_i(f, k)$ のピーク波数にとり規準化するとほぼ図—6 と同じような傾向を示す。

6. あとがき

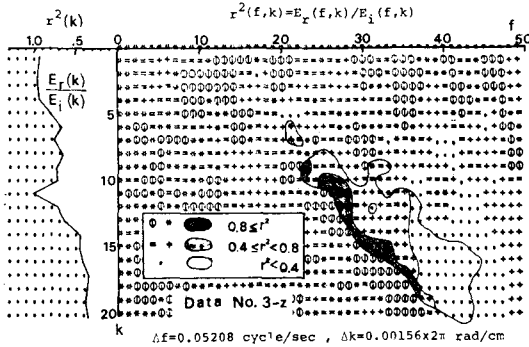
風波の反射現象は非常に複雑なものである。これまでは風の影響を抜いた実験を行ない、スペクトルの上に乗る ripple の振幅から反射率を求めようとしてきたが、浅水領域になるだけでこの方法はかなり精度の悪いものになってしまう。まして風の影響で吹送流や碎波があったりする場合に周波数スペクトルだけで考えているとわけがわからなくなってくる。周波数スペクトルは場所によって ripple の現われかたがすべて違うのだが、各点での平均値に相当する E_i



(a)



(b)



(c)

図-4 反射率(エネルギー)の等値線表示

(f) でさえ図-2 からわかるように $E_0(f)$ と似ても似つかぬ構造である。今回1データが1万以上という膨大な読み取りを断行してこの疑問を解決する試みの手助け

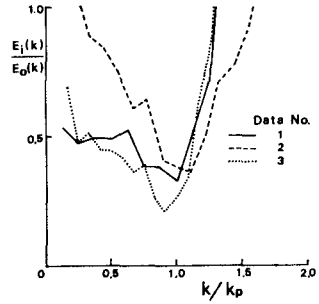


図-5 入射率の波数特性

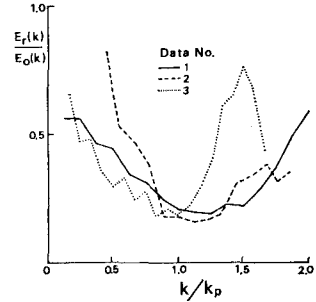


図-6 反射率の波数特性

をしていただいた市川工務店山田潤一氏、フジタ工業平馬博之氏に感謝の意を表する。またこの研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 光易 恒・水野信二郎: 逆風による波の減衰に関する実験的研究(1), 第18回海講演集, pp. 37-42, 1971.
- 2) 水野信二郎・光易 恒: 逆風による波の減衰に関する実験的研究(2), 第20回海講演集, pp. 457-461, 1973.
- 3) 石田 昭・金 泰順: 風波の波数周波数スペクトルに関する実験的研究, 第23回海講演集, pp. 317-322, 1976.
- 4) 加藤 始・鶴谷広一: 流れの中での反射波について, 第23回海講演集, pp. 390-394, 1976.
- 5) 石田 昭・伊藤親直: 風波の反射によって起こるスペクトル構造の規則的变化について, 第18回海講演集, pp. 43-47, 1971.