

波起し機によって起した不規則波の特性

岩 垣 雄 一*・石 田 昭**

1. 緒 言

これまで、波浪に伴う海岸工学上の諸問題を、主として実験的に研究する場合、不規則波を発生させることの困難さの問題もあって、有義波、平均波、あるいは最大波といった代表値に対応する規則波を発生させて実験を行ない、問題を処理することが多かった。しかしながら、こうした取り扱い方の合理性については何らの根拠もないし、結果の妥当性についても確かめられていない。したがって、不規則波を対象として実験を試みることに、そのためには所定の不規則波を実験的に発生させること、そして同時にその特性を完全に把握することが、急務となってきている。

不規則波の発生方法としては、(1) 風洞水槽において風波を発生させる方法、(2) 造波板の振動周期と振幅を連続的に変化させる方法¹⁾、(3) 有限個の規則波を重ね合わせる方法²⁾、(4) 造波板の動きそのものにランダム変動を与える方法³⁾などがある。昭和43年京都大学工学部に(3)の方法による不規則波発生機が設置された^{4), 5)}が、この波起し機は造波板に8個の周期の異なる単振動を重ね合わせた運動を与えるものである。この論文はこの方法によって起こした不規則波(合成波)を解析することにより、今後設置予定の(4)の方法による不規則波発生機に対する基礎資料を得るとともに、速度分散や、斜面上でのスペクトル構造の変化を調べることで、不規則波の特性を解明しようとするものである。

2. 実験方法および解析方法

(1) 実験方法

実験に用いた水槽は幅50cm、高さ80cm、長さ約30mの両面ガラス張り水槽で、その一端に油圧によって8個の単振動を重ね合わせることのできるピストン形式の造波板があり、他端は1/20勾配のアルミ製傾斜板の上に厚さ約3cmのシュロマットを敷き、さらにその上に金網マットを置いて、反射波を消すようにしてある。水深は40cmとし、造波板の運動と水位変化は、それぞれ、摺動抵抗器、および抵抗線式波高計によって、ビジュグラフ上に1~3分間記録した。記録速度は2cm/secとし、

0.1secごとにデジタル化して解析を行なった。波の測定は水槽中央部の5点、W-5~W-1(図-4参照)で行ない、単一波および各種の合成波の記録を得た。とくに資料番号F8-2のみは、一様水深部のほかに、斜面上(水深20cmと10cm)でも波を測定した。なお、資料番号の最初の数字は、組合わせた成分波の数を示している。

(2) 解析方法

単一波の場合は、直接波形記録から波高を読みとったが、合成波の場合にはフーリエ解析の原理によって、近似的に成分波高を求めた。いま、振幅 a_n 、周期 T_n 、初期位相 θ_n 、波長 L_n を持った成分波を、

$$a_n \exp i \left(\frac{2\pi}{T_n} t + \frac{2\pi}{L_n} x + \theta_n \right)$$

のように表示すれば、 N 個の合成波の波形 $\eta(x, t)$ は、その和としてつぎのように表わしうる。

$$\eta(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n \exp i \left(\frac{2\pi}{T_n} t + \frac{2\pi}{L_n} x + \theta_n \right) \dots (1)$$

$x=x_1$ での記録 $\eta(x_1, t)$ に、 $\exp i \{(-2\pi/T_c) \cdot t\}$ を掛けて時間平均をとると、次式が得られる。ここに T_c は観測時間である。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} \eta(x_1, t) \exp i \left(-\frac{2\pi}{T_c} t \right) dt \\ &= \sum_{n=1}^N \exp i \left(\frac{2\pi}{L_n} x_1 + \theta_n \right) \cdot \frac{1}{T_c} \times \int_0^{T_c} a_n \\ & \exp i \left(\frac{2\pi}{T_n} t - \frac{2\pi}{T_c} t \right) dt \\ & \approx a_c \exp i \left(\frac{2\pi}{L_c} x_1 + \theta_c \right) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

これによって、 T_c なる周期をもつ成分波の振幅 a_c と位相 $\{(2\pi/L_c)x_1 + \theta_c\}$ が得られる。実際の計算は $\eta(x, t)$ を0.1secごとにデジタル化し、積分を和に置きかえて計算した。なお、2点での記録 $\eta(x_1, t)$ および $\eta(x_2, t)$ の位相を求めれば、その位相差 $\Delta\theta$

$$\Delta\theta = \left(\frac{2\pi}{L_c} x_2 + \theta_c \right) - \left(\frac{2\pi}{L_c} x_1 + \theta_c \right) \dots \dots \dots (3)$$

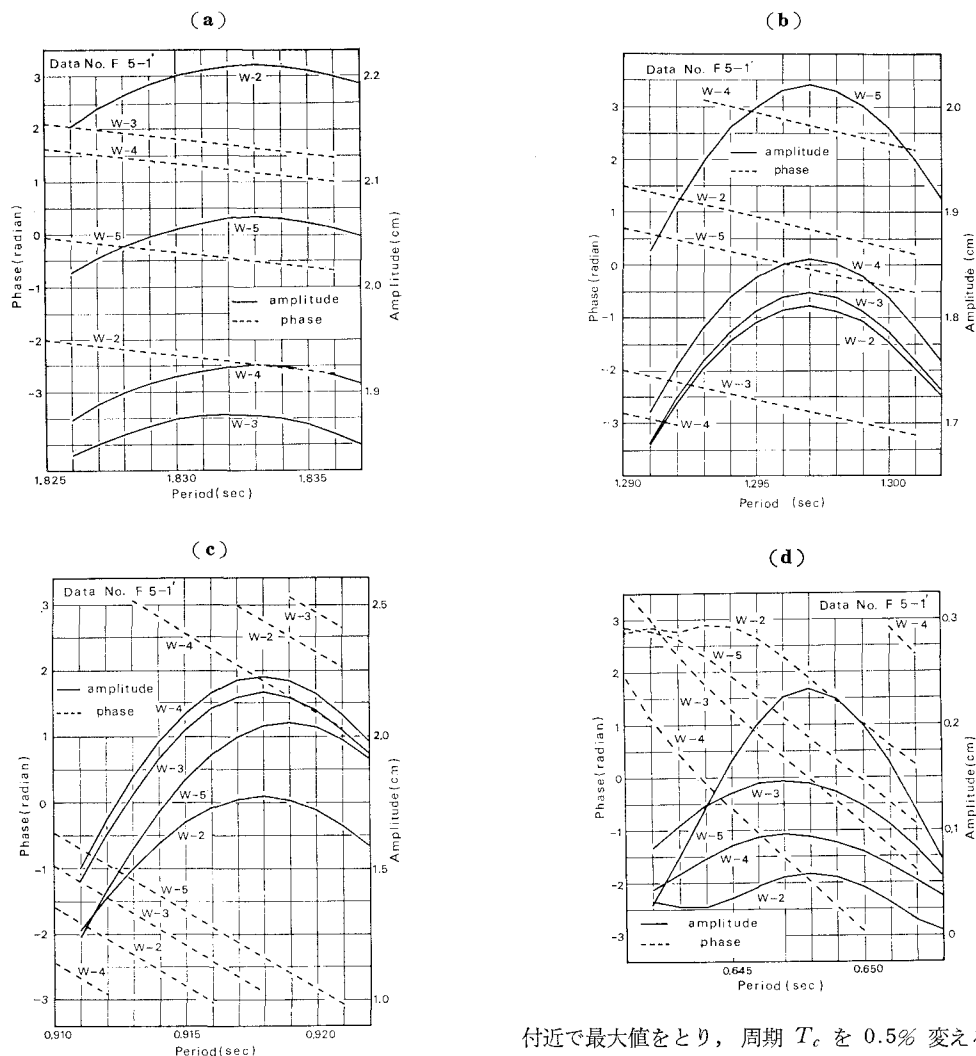
から、次式によって成分波の波長 L_c および伝播速度 C_c を求めることができる。

$$L_c = \frac{2\pi(x_2 - x_1)}{\Delta\theta} \dots \dots \dots (4)$$

$$C_c = \frac{L_c}{T_c} \dots \dots \dots (5)$$

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部

** 正会員 工修 名古屋工業大学講師 工学部

図—1 成分波周期 T_c の変化に伴う位相の主値と振幅の変化

付近で最大値をとり、周期 T_c を 0.5% 変えると、 a_c は 3% しか変化しないが、(b) では $T_c=1.297$ sec で最大値をとり、 T_c を 0.5% 変えると、 a_c は 8% も変化する。こうした変化は、周期が短い成分波になるほど著しく、(c) および (d) ではそれぞれ、0.918 sec および 0.648 sec 付近で最大値をとって、 T_c が 0.5% 変化すると、それぞれ 21% および、29% も変化するので、成分波の周期を正確にみつける必要がある。とくに、(d) の場合は、 a_c の値が最大で 0.23 cm といった小さな成分波であり、 T_c を変えると、振幅および位相の値は他の場合と違った変化を示す。

これは後に述べるように、この周期の成分波は、線型に重ね合わさず、造波板前面で砕波してしまうために、似通った周期を持つ微小な変動が出現することが原因と思われる。

なお、スペクトル計算については、相関関数より求める Blackman-Tukey の方法を用いて、上記と同じく 0.1 sec 間隔でデジタル化した記録から計算した。

なお、計算は電子計算機を使用するため、位相 $\{(2\pi/L_c)x + \theta_c\}$ の値は主値をとり、波長が波高計間隔 ($x_2 - x_1$) より短い場合には、位相差に $2n\pi$ ($n=1, 2, \dots$) を考慮しなければならない。

図—1(a)~(d) は、資料番号 F 5-1' について、W-1 を除く 4 点で得た記録から、周期 T_c をわざわざ変えて成分波の位相 $\{(2\pi/L_c)x + \theta_c\}$ と振幅 a_c の変化を調べたものである。加え合わせた 5 個の単振動の中で、約 0.46 sec という最も短周期のものは、単独に動かしても、規則的な単一波が発生しなかったので図示していない。すなわち、造波板の振幅は 1.1 cm であるが、図—2 に示す単一波の発生範囲外の周期であると思われる。図—1 をみると、一般的に、 T_c に誤差があっても、位相そのものは変化するが、位相差はほとんど変化しないから、波長および伝播速度の計算には影響を与えないことがわかる。しかし、 a_c の値は、(a) では $T_c=1.833$ sec

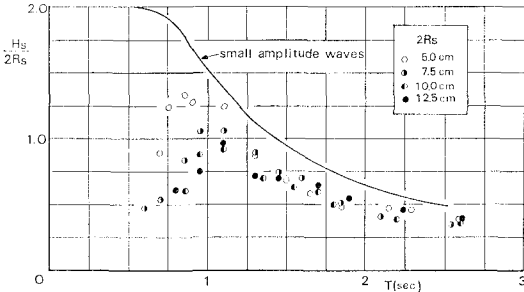
3. 実験値の解析結果

(1) 単一波の特性

図-2 は、ピストン形式の波起し機による単一波の発生特性を示したもので、縦軸は波高 H_s と造波板の全振幅 $2R_s$ との比、横軸は周期 T がとってある。実線は、微小振幅波理論を用いて Biesel⁽⁶⁾ が導いた次式を表わしている。

$$\frac{H_s}{2R_s} = 2R_s \frac{\sinh^2 kh}{\sinh kh \cdot \cosh^2 kh + kh} \quad \dots\dots\dots (6)$$

図-2 単一波の発生特性



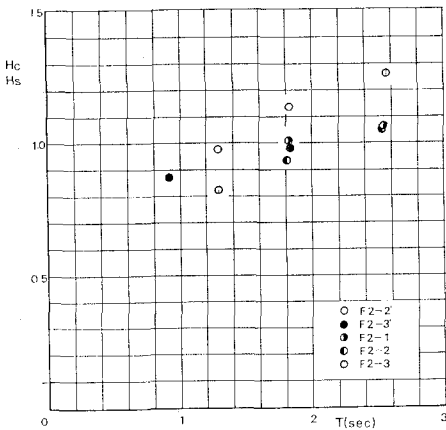
ここで、 h : 水深、 $k=2\pi/L_s$ で L_s は波長である。一般的な傾向として、実験値は理論値より小さく、かつ周期がある値より小さくなると実験値が急激に減少して、生成可能な波の周期に限界があることがわかる。この限界の周期は造波板の振幅 R_s が大きいほど大きいことがわかる。

(2) 合成波の発生特性

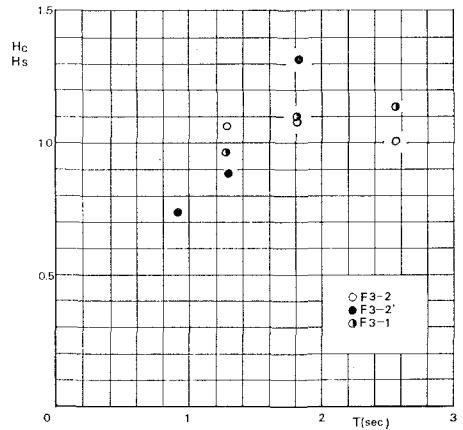
図-3 (a)~(d) は、式 (2) から求められる成分波高 $2a_c$ の各点 (W-1, W-2, W-4) での値を平均して H_c で表わし、単一波の波高 H_s との比を示したものである。 H_c/H_s の値は、一般的に周期が 1.0 sec 程度以上の波については、約 1.0 であって、線型重ね合わせになっているが、1.0 sec 以下の波については、 H_c/H_s の値が 1.0 以下であり、約 0.6 sec 程度の短周期の波になると急激に 0 に近づいて発生した波が単一波の場合より小さくなることがわかる。この原因としては、単振動をいくつも合成したことによって、造波板の移動速度が増大し、造波板前面の水粒子速度が瞬時的に波速を越える場合が生じて、砕波することが考えられる。造波板前面

図-3 合成波の発生特性

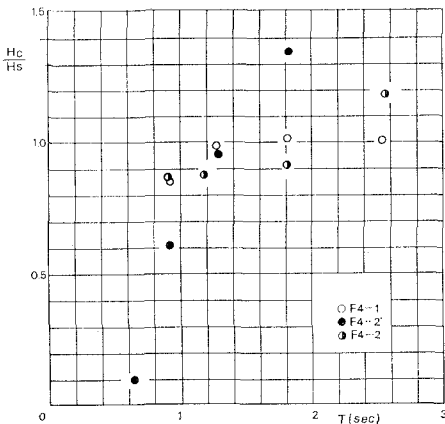
(a) 2 成分波の場合



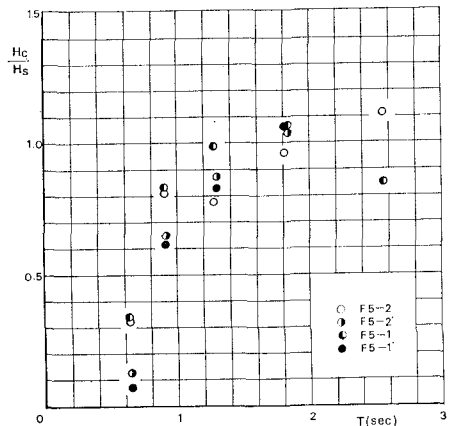
(b) 3 成分波の場合



(c) 4 成分波の場合



(d) 5 成分波の場合



における砕波現象は、目視観察によって確かめられる。したがって、周期が短く、振幅が大きくなるほど、また組み合わせる成分波の数が多くなるほどこうした傾向が現われるはずであるが、実験に用いた波起し機では、造波板の最大変動が 30 cm という限界があるために、成分波の数が多くなると個々の単振動の振幅が小さくなり、(a)~(d) では、すべて同じような結果となっているものと思われる。

(3) 速度分散

図-4 は、合成波の記録の一例で、横軸に時間を取り、縦方向に波高計の距離をとることによって、見かけの波速 C を求め、図中に示してある。卓越した波は、一定の波速をもって進行しているが、他の波は波速が変化し、全体として波形が変化して、速度分散のあることを示している。

図-5 は、横軸に波高計間隔 d を微小振幅波理論によって計算した各成分波の波長 L_a で割ったもの、縦軸に式(4)から求めた波長 L_c を L_a で割ったものを取り、解析値をプロットしたものであるが、 $d/L_a > 1/3$ であれば、どのような間隔であっても、 L_c/L_a の値はほぼ 1.0 の一定値になり、精度がよいが、 $d/L_a < 1/3$ の場

合には L_c/L_a の値が散乱し精度が悪いことがわかる。したがって、図-6 に示した成分波の波速は $d/L_a < 1/3$ の範囲に入る資料を除外し、かつ最大の波高計間隔 (F 5-1 は 240 cm、その他

は 210 cm) から求めた値をプロットした。図をみると、成分波の波速 C_c は、 $T_c < 1.5$ sec では、微小振幅波理論による波速 C_a (図中の実線) に等しいが、 $T_c > 1.5$ sec になると、やや C_a より大きくなる傾向がみられる。

(4) スペクトル解析

図-7 は資料番号 F 8-1 についてスペクトル解析を行なった結果を示したもので、記録時間は 100 sec、自由度約 20 で計算した。図中実線は、造波板の変動のパワースペクトルであり、破線は、波のパワースペクトルであるが、3点 (W-1, W-2, W-4) で得たスペクトルの値の最大値と最小値をそれぞれ2本の点線で結んだものである。図-7 および図-9 中の丸印は、式(2)から求められる a_c の値から、 $a_c^2/4df$ ($df=0.05$ cps) を計算し、造波板の成分振動および成分波のエネルギー密度に換算してプロットしたものである。図からわかるように、造波板の変動は非常に線スペクトルに近いものであり、波のスペクトルは 1.2 cps 以下では線スペクトルに近いが、それ以上になると、成分波

図-6 成分波の波速と周期との関係

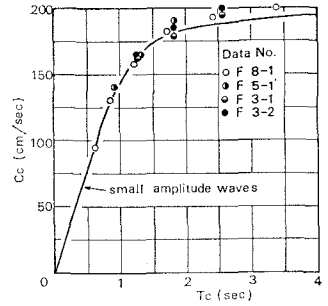


図-4 合成波の記録例

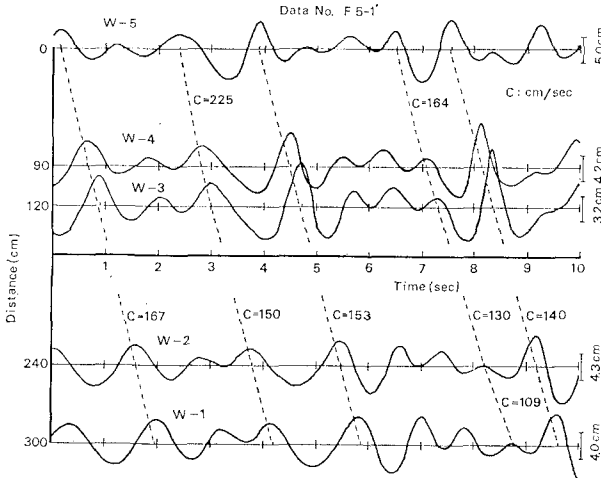


図-5 波高計間隔による波長測定精度

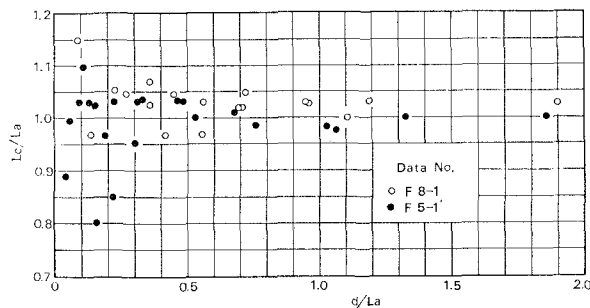


図-7 スペクトル解析の一例

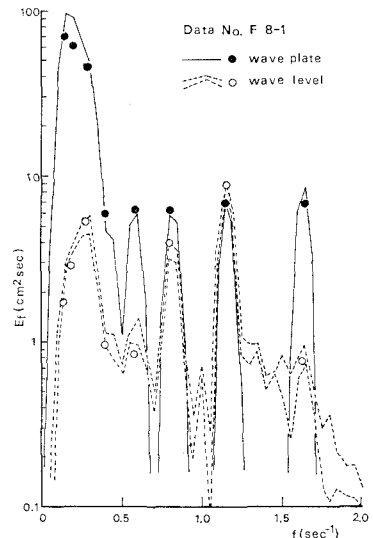
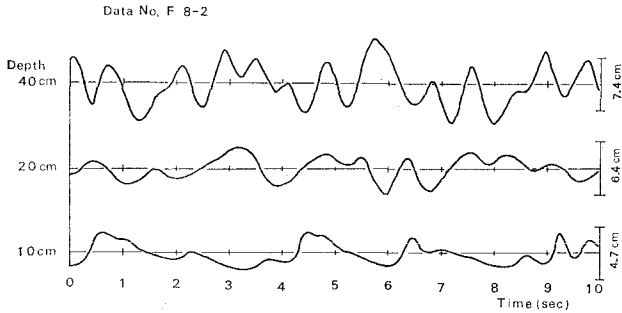


図-8 斜面上での合成波の記録



の周波数以外のところにもかなりのエネルギーを持った構造になっていることがわかる。これは、前述のように、周期の短い波が砕波することによってエネルギーが分散するものと思われる。

(5) 斜面上の合成波

図-8 は、1/20 勾配の斜面上での合成波の変形を示す、資料番号 F 8-2 の記録である。一様水深 (40 cm) 上の波は、斜面上の水深 20 cm のところで、すでに波高がかなり減少し、水深 10 cm のところでは、波が砕波して、波形が左右非対称になっていることがわかる。図-9 は、この記録をスペクトル解析したもので、記録時間は 150 sec, 自由度約 30 で計算した。図をみると、水深 40 cm と 20 cm については、1.5 cps 以下の範囲では、非常に線スペクトルに近く、したがってスペクトルのピーク値と式 (2) から求めた丸印もよく一致しているが、水深 10 cm になると、連続スペクトルに近くになって、スペクトルの値と丸印が一致していないことがわかる。このことは砕波することによって、違った周波数をもった新しい波が発生したことを意味している。Druet⁹⁾

図-9 斜面上でのスペクトルの変形

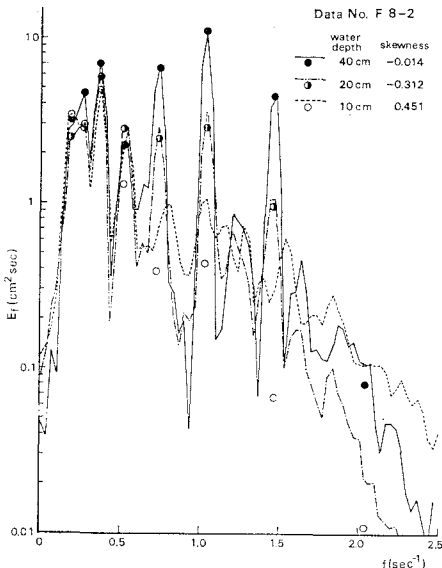


図-10 水深 10 cm におけるスペクトル構造

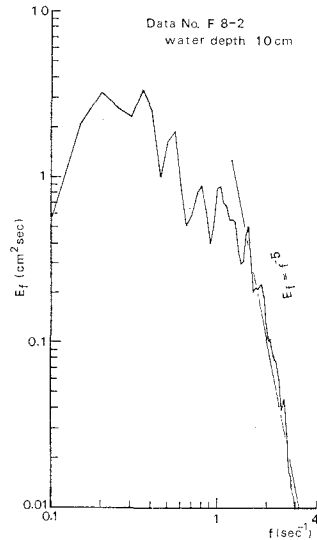
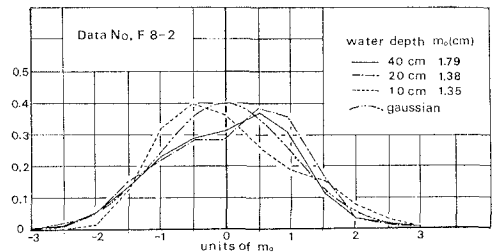


図-11 水位の頻度分布



らは南バルチック海の海岸で観測を行ない、砂州の上で砕波すると、ある周波数領域でエネルギーが増加することを見出している。図-10 は、水深 10 cm におけるスペクトルを両対数紙上にプロットしたもので、1 cps 以上の範囲では $E_f = f^{-5}$ にしたがっていることがわかる。図-11 は水位の頻度分布を調べたもので、水深 40 cm と 20 cm では、負のひずみを示しているが、水深 10 cm によると正のひずみを示すようになり、実際の海岸波浪のひずみ方と似てくる⁹⁾。

4. 結 語

単振動を合成し、ピストン形式の波起し機で合成波を作る場合、本実験で用いた最大重ね合わせ数 8 個、造波板の最大変動量 30 cm という条件でつぎのことが見出された。

(1) 約 1 sec 以上の周期の波は、個々に単振動をさせた場合に発生する単一波が線型的に重ね合わさり、線スペクトルに近い波となる。(2) 約 1 sec より短い周期の単振動は、単一波より小さな成分波となって重なり、とくに約 0.6 sec より短い波になると、砕波することによって、エネルギーが分散し、急激に小さな成分波となるが、連続スペクトルに近い波となってくる。(3) さらに

波を斜面上に進入させて、人為的に碎波を起こせば、全エネルギーは、かなり減少するがスペクトル構造は連続したものになって、新しく別の周波数の波が発生してくる。(4) 合成波の成分波としての波速は 1.5 sec 以上の周期の波の場合、微小振幅波理論よりもわずかに大きくなる傾向がみられる。

なお、この研究は文部省特定研究費による研究の一部であることを付記するとともに、波起し機の設計製作にあたられた土屋義人教授 および 正豊工学実験装置製作所、さらにこの研究に協力して頂いたKK川崎重工業の後藤克彦氏(当時学部学生)に対して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Lewis, E.V.: Irregular Waves in Model Tanks, Proc. of the 1st Conf. on Ships and Waves. 1955, pp. 324-331.
- 2) 合田良実・竹田英章: 不規則波に対する護岸の期待越波流量について, 第 15 回海岸工学講演会講演集, 1968. 12, pp. 259-266.
- 3) Mohus, I.: Generation and Measurement of Simulated Ocean Waves, Automatic Control Laboratory Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1960, p. 24.
- 4) 岩垣雄一・土屋義人・石田 昭: 不規則波発生機の試作とそれによる波の特性に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, 昭 44.5, II-31.
- 5) Iwagaki, Y., Tsuchiya, Y. and Ishida, A.: A Generator of Irregular Waves and Analysis of Generated Waves, Proc. 13th Congress of IAHR, Seminar No. 4, Sept. 1969.
- 6) Biesel, F. and Suquet, F.: Laboratory Wave-Generating Apparatus (Translation of a Series of French Articles from La Houille Blanche by Straub, G.L.) 1954.
- 7) Barber, N.F.: Experimental Correlograms and Fourier Transforms, Pergamon Press, p. 136.
- 8) Druet, C., Massel, S. and Zeidler, R.: Structure of Wind Waves in a Surf Zone of South Baltic Sea, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng., 1969.
- 9) 柿沼忠男・石田 昭・門司剛至: 記録にもとづく海岸波浪の非線型性の解析, 第 15 回海岸工学講演会講演集, 昭 43.11, pp. 73-79.