

電気油圧式不規則波発生機について

岩垣 雄一*・村上 仁士**・酒井 哲郎***・木 村 晃****

1. 緒 言

従来、海岸工学上の諸問題は、多くの場合、一様な規則波を対象として研究され、それが計画設計に応用されている。しかし、実際の海岸波浪は不規則波であって、その不規則性は一般にスペクトルによって表現されるが、こうした波の不規則性が、どの程度海岸工学上の諸問題に影響をおよぼすかは、ほとんどわかっていないといつてよい。このような意味から、昭和44年9月に京都で開催された国際水理学会議においても、「不規則波の発生と解析」という題目のセミナーが行なわれたのであるが、その際に不規則波の研究の必要性が議論され、発言者はすべて今後大いに研究を推進させるべきであることを強調したことは注目すべきであった¹⁾。

不規則波の研究を実験室内で行なうためには、それを再現させる必要がある。どうしても不規則波発生機が必要になってくる。不規則波発生機には、1) 風洞水槽による方法、2) 造波板を駆動するモータの回転数と運動の振幅を時々刻々に変化させる方法、3) 有限個の正弦波を合成する方法、4) ランダム波を発生させる方法、などがある。1) については、風波のシミュレーションを目的とした風洞水槽内の発生波の研究が盛んに行なわれるようになったし、2) についてはもっとも簡単な方法として合田・永井²⁾の研究がある。3) については著者らが油圧を利用した機械的合成方式のものを製作した³⁾が、運輸省港湾技術研究所においても、電気的合成方式のものを試作している⁴⁾。4) の方法によるものは、ランダム変動を電気的入力として造波板を駆動させるもので、ここで紹介しようとする発生機がそれに相当する。なお、造波板の駆動方式として油圧式のものと電磁式のものとに分かれるが、この発生機は前者の駆動形式のものである。

一般に油圧式にしる電磁式にしる、最近では主として振動台とか材料試験機の外力として、ランダム振動を与える方式のものが使用されるようになった。したがって、これを利用して水槽内に不規則波を発生させようと

する試みが行なわれるのは当然であって、最初にアメリカのカリフォルニア大学で船舶実験用として試作され、ついで1960年頃にノールウェイ工科大学でも不規則波発生機の試作を始め⁵⁾成功したようである。最近では1969年3月にオランダのデルフト水理実験所で長さ100m、幅8mの大風洞水槽内にこの方式の発生機が設置されたのを初めとし、イギリスの国立水理実験所でも製作されつつあるようであり、またフランスでも計画されている。わが国では電磁式のものが大阪大学で作られたが、著者らは次に述べるような油圧式の発生機を試作したので、ここにその構造や造波特性を述べてみたい。

2. 不規則波発生機の原理と構造

不規則波発生機は2基のアクチュエータにより造波板に運動を与える駆動部、容量40 l/minの油圧ポンプを有する油圧源および制御回路を集めた制御装置の3つの独立したユニットから構成され、各ユニットは油圧パイプおよび電気ケーブルにより結合されている。図-1に示すように、発生機の入力信号としては、超低周波発振器、超低周波ランダムノイズ発振器およびデータレコーダからの外部入力を使用して、正弦波、三角波および矩形波の規則波ならびにランダム波の電気信号を発生させることができ、またとくに孤立波も発生させることができるようになっている。ランダムノイズ発振器からの出力信号はDC~200 cpsまで平坦なスペクトルを持ち、このうちの0.2~5 cps(周期0.2~5 sec)を使用周波数範囲としている。この発振器の出力はスペクトラム修正帯域濾波器に導かれるが、この濾波器は0.2~5 cpsの範囲で1/3 oct幅に分割された15本の帯域濾波器が組合わされており、それぞれのフィルターの出力を調整して、任意のスペクトルを得ることができるようになっている。この帯域濾波器によって、1 cps以下のランダム波と1 cps以上の波に分割されて、2基のアクチュエータ駆動用のサーボ増幅器へ送られる。これらの電気信号は各サーボ増幅器により増幅されてサーボ弁に送られ、サーボ弁では油圧源から送り込まれる高圧油を入力信号にしたがって制御し、アクチュエータの往復動シリンダの左右の室に交互に送り込み、ピストンを高速に作動させ造波板を駆動させる。この時、低周波(1 cps以下)の波形信号は、図-2に示すように、荷台を駆動するアク

* 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

*** 学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科

**** 学生員 京都大学大学院 工学研究科

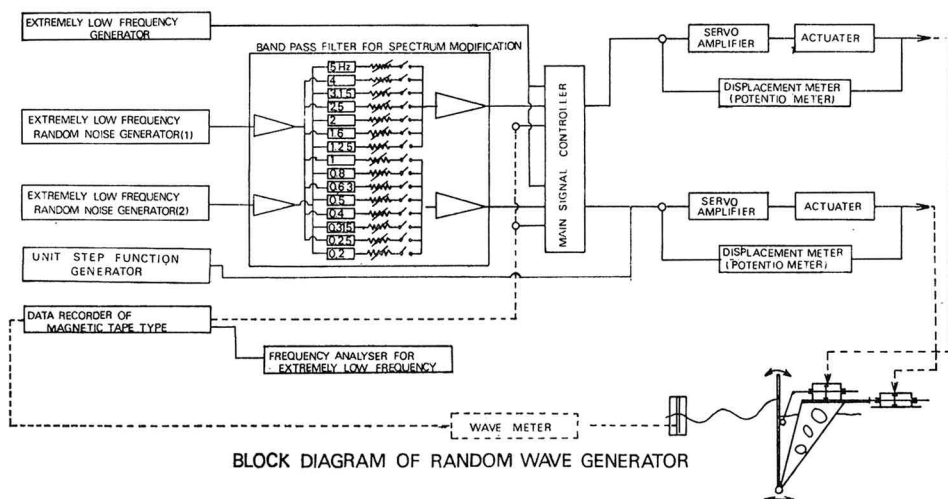


図-1 不規則波発生機のブロックダイアグラム

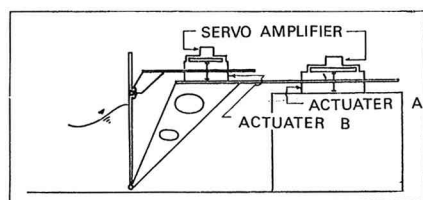


図-2 造波板の構造

チュエータ (A) を作動させ、高周波 (1 cps 以上) の波形信号は直接フラッター型の造波板を駆動するアクチュエータ (B) を動かす。したがって、2つのアクチュエータの動きを合成した造波板の運動は、もとの入力信号と同一の波形となるはずである。この時のピストンの運動は変位計によってとらえられ、変換器を経て電気信号として制御装置へフィードバックされ、入力信号との差が小さくなるように、すなわち検出信号と等しくなるようにサーボ機構が働く。孤立波を発生させる場合は、回路の切換え操作により、主信号制御器が作用なくなり、直接アクチュエータ (A) を駆動させるサーボ増幅器へ信号が送られ、任意の波高をもつ孤立波を発生させることができるようになっている。なお、写真-1 およ

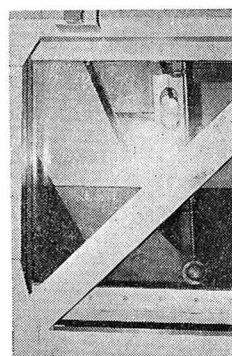


写真-2 造波板

び 2 はアクチュエータおよび造波板を水槽側面から写したものである。

3. 実験方法および解析方法

実験に用いた水槽は幅 50 cm、高さ 75 cm、長さ 30 m の両面ガラス張り水槽であり、その一端に不規則波発生機が設置され、他端には水槽末端からの反射を防止するために消波装置を設けた。実験水深は 30 cm とし、造波板から約 4 m の地点に電気抵抗線式波高計を設置して水位変化を測定した。入力信号、造波板の運動および水位変化は、ペン書きオシログラフおよび磁気テープに記録し、随時オシロスコープで波形をモニターした。帯域濾波器の特性を調べるために、各フィルターの振幅調整器の出力を最大および 1/2 にして、それぞれ約 5 分間、テープスピード $3\frac{3}{4}$ ips でデータレコーダにより記録した。スペクトル解析に関しては、Blackman-Tukey の方法を用いて、実験から得られたデータを 1.25 cps ごとに 2000 個、自由度約 20 で計算した。

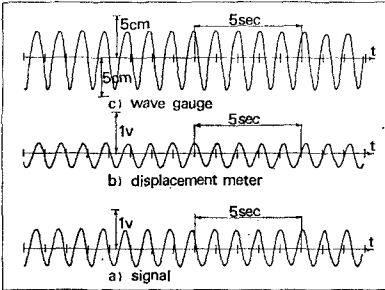


写真-1 アクチュエータ

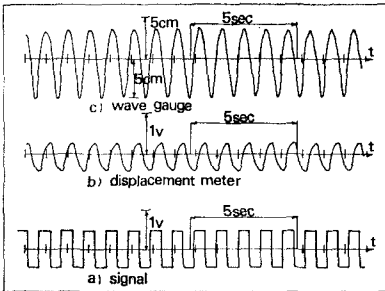
4. 不規則波発生機の造波特性

(1) 入力信号と造波板の運動特性

超低周波発振器は規則波を与えるための単一信号を発生する発振器であり、正弦波、三角波、矩形波を発生させる。また各出力波の発振周波数および発振振幅は自由に選択できるようになっている。図—3 および図—4 はアクチュエータ (A) を駆動させた場合の正弦波および矩形波の入力信号とそれによる造波板の変位および発生波の一例を示したものである。(a) および (b) を比較すると、入力信号に対し造波板の応答にわずかの時間遅れが生ずることがわかる。

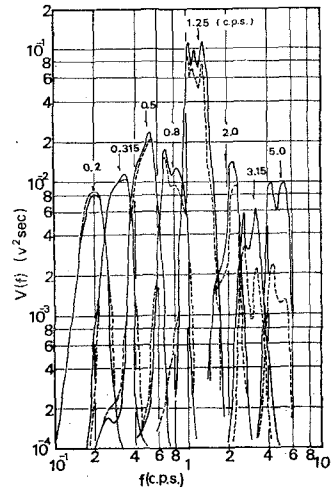


図—3 正弦波の入力信号と造波板の変位および水面波形



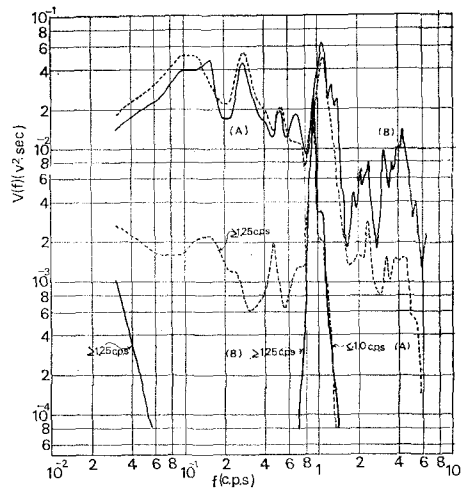
図—4 矩形波の入力信号と造波板の変位および水面波形

超低周波ランダムノイズ発振器からの出力は $1/3$ oct, ごとに分けられた帯域濾波器 15 本からなるスペクトラム修正用帯域濾波器に導かれる。各濾波器の出力にはそれぞれ 100~10% まで連続可変の振幅調整器を備え、その出力信号を 0.2~1 cps (1~5 sec), 1.25~5 cps (0.2~0.8 sec) の 2 チャンネルに分け、それぞれがアクチュエータを通じて造波板の運動として合成される。図—5 は、横軸に周波数 f を、縦軸に入力信号のスペクトルおよび造波板の変位スペクトルを $V(f)$ で示し、それぞれ 0.2, 0.315, 0.8, 1.25, 2, 3.15 cps および 5 cps の濾波器の振幅調整器の出力を最大にした場合の入力信号のスペクトル (実線) と造波板の変位のスペクトル (破線) を比較したものである。実線および破線のいずれも、各濾波器を通したパワースペクトルのピーク値に



図—5 各帯域濾波器の周波数特性と造波板の変位スペクトル

かなりの差がみられ、とくに 1.25 cps のものは他のものより 5~10 倍も大きい。また、高周波になるにしたがって入力信号に対する造波板の運動の応答特性が悪くなり、1.25 cps 以上の高周波になると造波板はフラッター型のものが運動し、高周波に追従しやすくなっているにもかかわらず 2 cps では入力信号のパワーの 66% に低下し、5 cps になると 25% に低下している。図—6 および図—7 は、0.2~5 cps にわたり、全バンドパスフィルターの振幅調整器の出力を最大にした場合および 1/2 にした場合の入力信号のスペクトル (実線) と造波板の変位のスペクトル (破線) を示したものであり、(A) は 0.2~1 cps, (B) は 1.25~5 cps の範囲にわけて記録をとっている。図—6 および図—7 からわかるように 1.25



図—6 0.2~1 cps および 1.25~5 cps 別の入力信号スペクトルと造波板の変位スペクトル (振幅調整器の出力を最大にした場合)

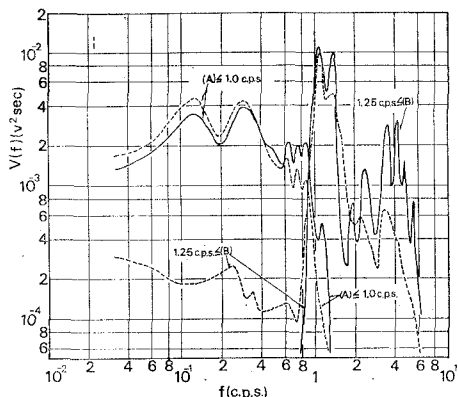


図-7 0.2~1 cps および 1.25~5 cps 別の入力信号スペクトルと造波板の変位スペクトル (振幅調整器の出力を 1/2 とした場合)

cps 以上の高周波になるとパワースペクトルの絶対値が低下し、しかも図-5からもわかるように入力信号に対する造波板の応答特性が悪くなる。また超低周波ランダムノイズ発振器からの信号が汙波器を通過した後、そのスペクトルがホワイトノイズのように平坦になると理想的である。しかし各汉波器の周波数特性に多少の差があるために、凸凹が生じている。また振幅調整器の出力を 1/2 にすれば、図-6、図-7 のスペクトルを比較するとわかるように、全体として 1/5~1/10 に減少している。これは入力信号の電圧が約 1/2~1/3 になることを示している。なお 1.25 cps よりも高周波の場合にはアクチュエータ (B) のみが作用する機構になっているにもかかわらず、図-6 および図-7 の破線で示すように、低周波側に若干のスペクトル成分をもっている。この原因はよくわからないが、絶対値そのものは大きくない。

(2) 造波板の運動と発生波の関係

図-8 および図-10 は汉波器の振幅調整器の出力を最大にした場合、図-9 および図-11 は出力を 1/2 にした場合で、図-8 および図-9 は 0.2~1 cps (1~5 sec)、図-11 および図-12 は 1.25~5 cps (0.2~0.8 sec) の間の造波板の変位 (破線) と発生波 (実線) のスペクトルの関係を示したものであり、横軸に周波数 f を、縦軸に造波板の変位スペクトルおよび発生波のスペクトル $P(f)$ をとって表わしている。図-8 および図-9 はアクチュエータ (A) のみが作用した場合であるが、いずれも低周波になるにしたがって急激に発生波のエネルギーが減少し、0.5 cps では発生波高は造波板の変位に対して約 60% になり、0.2 cps では約 25% になってしまう。図-10 および図-11 はアクチュエータ (B) のみが作用した場合であって、2.5 cps より高周波側では波は発生しなくなることがわかる。図-12 および図-13

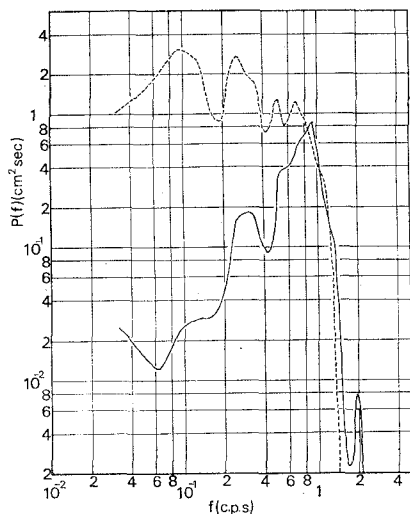


図-8 0.2~1 cps の入力信号による造波板の変位スペクトルと水面波のスペクトルの比較 (汉波器の振幅調整器の出力を最大にした場合)

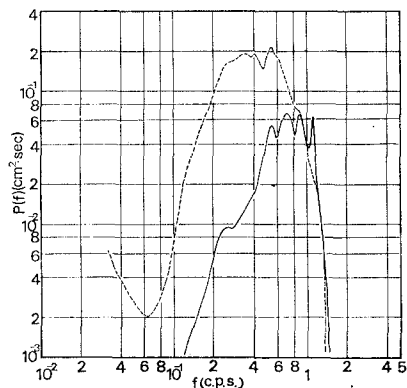
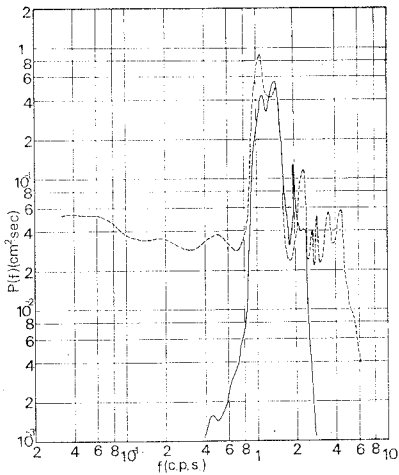
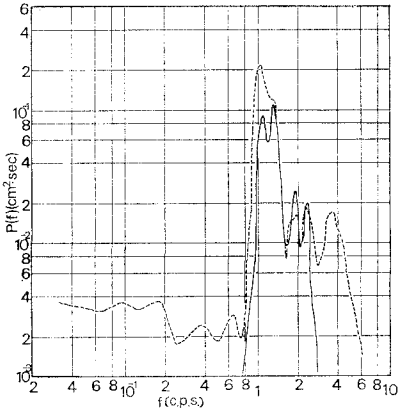


図-9 0.2~1 cps の入力信号による造波板の変位スペクトルと水面波のスペクトルの比較 (汉波器の振幅調整器の出力を 1/2 にした場合)

は 0.2~5 cps (0.2~5 sec) にわたり、帯域汉波器の出力を最大とした場合および 1/2 にした場合の造波板の変位 (破線) と発生波 (実線) の関係を示したものである。図-10 および図-11 にもみられるように、おおよそ 0.8~2 cps の範囲では造波板の運動に対する波の発生特性がかなりよく、2.5 cps より高周波になると波は発生しなくなる。また、0.8 cps より低周波になると波高は造波板の変位にくらべ急激に減少する。この傾向は Biesel and Suquet⁶⁾ の造波板の変位と波高に関する理論により説明でき、その程度は図-8 および図-10 の場合よりも少ないが、これは 0.2~5 cps の組み合わせの際に、低周波側に 1 cps 以上の運動を受けつつフラッター型の造波板の変位にあらわれている低周波のエネルギーがい



図—10 1.25～5 cps の入力信号による造波板の変位スペクトルと水面波のスペクトルの比較（浪波器の振幅調整器の出力を最大にした場合）

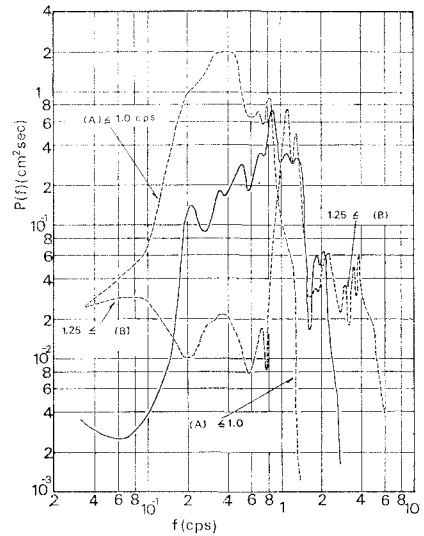


図—11 1.25～5 cps の入力信号による造波板の変位スペクトルと水面波のスペクトルの比較（浪波器の振幅調整器の出力を 1/2 にした場合）

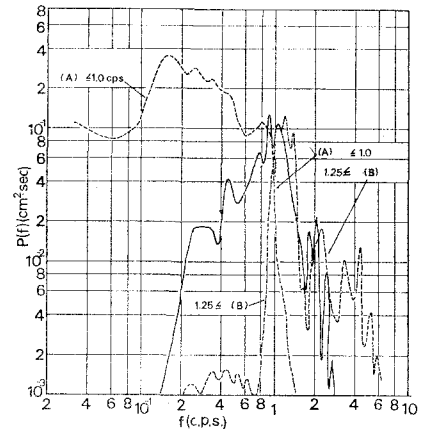
くぶん加算されて、全体としてわずかに波高を大きくするものと考えられる。

（3）不規則波の線型性の検討

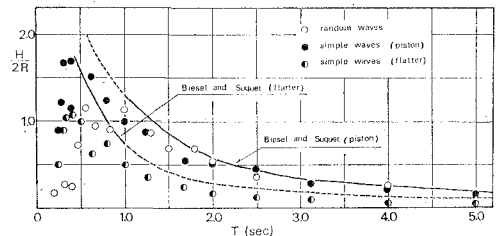
ここでは、造波板の変位とそれによって起こる波の応答特性の線型性を検討してみよう。図—14 は、不規則波発生機のアクチュエータ（A）（ピストン型）およびアクチュエータ（B）（フラッター型）のみを使って正弦波を起こした場合、またアクチュエータ（A）および（B）を使って不規則波を発生させた場合についての造波特性を示している。縦軸は波高 H と造波板の全振幅 $2R$ との比、横軸は周期 T をとっている。なお不規則波については、図—10 および 12 のスペクトルから造波板の全振幅と発生波高との比を求めて点描した。図中の 2 本の曲線は微小振幅波理論を用いて Biesel-Suquet⁶⁾ が導いた次式を表わしている。



図—12 0.2～5 cps の入力信号による造波板の変位スペクトルと水面波のスペクトルの比較（浪波器の振幅調整器の出力を最大にした場合）



図—13 0.2～5 cps の入力信号による造波板の変位スペクトルと水面波のスペクトルの比較（浪波器の振幅調整器の出力を最大にした場合）



図—14 規則波および不規則波の造波特性

ピストン型

$$\frac{H}{2R} = \frac{2 \sinh^2 kh}{\sinh kh \cosh kh + kh} \dots\dots\dots(1)$$

フラップ型

$$\frac{H}{2R} = \frac{2 \sinh kh}{kh} \frac{1 - \cosh kh + kh \sinh kh}{\sinh kh \cosh kh + kh} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 h は水深、 $k=2\pi/L$ 、 L は波長である。

一般的な傾向として規則波の実験値は理論値よりもわずかに小さく、長周期になるほどフラッター型よりもピストン型の方が理論とよく一致している。また周期がある値よりも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。不規則波については、1 sec よりも大きい周期になるとピストン型で起こした正弦波の実験値とよく一致し、0.5~1 sec の範囲ではフラッター型で起こした正弦波の実験値ともよい一致を示す。この発生機は 1 sec を境界にして、それよりも大きい周期に対する造波板の運動をピストン型が行ない、それよりも小さい周期ではフラッター型のものが作動するようになっていて、0.5 sec よりも大きい周期では比較的線型性があると考えてよいことがわかる。0.5 sec 以下の周期では造波板の前面で碎波し急激に波高が減少するが、この範囲は造波板の変位がパラメーターとして関係するために、線型性を期待することはできない。

4. 結 語

以上、著者らが試作したランダム波を入力信号とする電気油圧式不規則波発生機について述べたが、まだ所要

の波のスペクトルを与えて、それを再現させるように発生機を操作する段階までに至っていない。しかし造波特性の線型性の存在が確認されたので、その操作はあまりむずかしいことではないと思われる。今後は、この発生機を用いて、波の不規則性が海岸工学上の諸問題におよぼす影響を詳細に調べてゆくつもりである。

最後に、この発生機は株式会社島津製作所によって製作されたが、その際、同製作所の辻氏および辻井氏に大変お世話になった。ここに、厚く謝意を表するとともに、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付記する。

参 考 文 献

- 1) Iwagaki, Y.: General Remarks, Seminar 4, Generation and Analysis of Random Waves, Proc. of 13th Congress of I.A.H.R., Vol. 5~2, 1969, pp. 568~569.
- 2) 合田良実・永井康平: 造波板の変速運動による発生不規則波のスペクトルについて, 運輸省港湾技術研究所報告, 第8巻第3号, 昭44.9. pp. 47~75.
- 3) 岩垣雄一・石田昭: 波起機によって起こした不規則波の特性, 第16回海岸工学講演会講演集, 昭44.12, pp. 29~34.
- 4) 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, 昭43.12, pp. 259~266.
- 5) Mohus, I.: Generation and Measurement of Simulated Ocean Waves, Automatic Control Laboratory, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Dec. 1960, pp. 1~23.
- 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.