

不規則波発生機による現地波浪のシミュレーションシステム

岩 垣 雄 一*・木 村 晃**

1. 緒 言

一般に海岸もしくは海中に構造物を設置する際、これら構造物が現地波浪より受ける種々の影響に対して十分な安全性を確保するために、現地波浪の統計的代表波、たとえば有義波等を用いて一定の安全率を考慮し決定した波を設計波として採用し、次にこの波の持つ種々の特性と従来規則波を対象として行われてきた研究成果とを対応させて外力を決定し、それに耐えるように設計施工を行ってきたわけである。しかし現地波浪の不規則性およびその統計的代表波の持つ物理的意義が必ずしも明確でない現在、こうした設計方法を探ることによって、どの程度構造物の安全性が期待できるかという点については十分明らかなでない。事実、ある程度の安全性を考慮して設計した海岸・海洋構造物が、年々波浪によりかなりの被害を受けている。こうした被害が繰返されるのは、波により構造物が受ける影響が、従来の規則波を対象として行われた研究においても十分定量的に把握されていない場合もあることをあげることもできるが、その他に、より根本的な問題点として、

(1) 設計波以上の破壊力を有する波浪が来襲する可能性があること、

(2) 規則波とその平均値が等しい不規則波とでは、構造物に異なる影響を及ぼすことがあること、

をあげることができる。(1)は現地波浪の生起確率的特性に関する問題であり、長期にわたる現地波浪の定常的な観測が必要である。現在運輸省において進められている 50m に及ぶ大水深における現地波浪の観測網¹⁾が完成し、定常的な観測が開始されると、この問題点に関する研究の飛躍的な進展が期待される。一方、(2)の問題点に関しては、波または波によりひきおこされる現象が非線型な特性を有する場合に特に問題となるものであり、海岸構造物が砕波点付近の波の非線型性が一番強い部分に集中して構築されることを考えると、構造物が波から受ける影響を定量的に把握するためには、従来の線型的な取扱い方では必ずしも十分であるとは考えられない。最近になってこの問題点の解決のための一つの方法として、実験室内において現地波浪と同様な特性を有す

る不規則な波を発生させ、構造物の模型等を用いてその動的特性あるいは波浪の変形特性を実験的に究明し、現地波浪の有する不規則性が各種構造物に及ぼす影響を定量的に評価しようとする試みが開始されている。こうした研究を可能とし、その結果を意義あらしめるためにはまず、実験水槽中において現地波浪と同様な特性を有する不規則波浪を発生させる手法を確立しなければならない。著者らは、ここ数年来、実験水槽内において任意の特性を有する不規則波浪を発生させる方式に関する理論的・実験的研究^{2),3),4)}を行ってきたが、このたびは不規則波浪のシミュレーションシステムを完成したので、3つの例を示してこのシステムの特性を明らかにするとともに、結果についても若干の考察を行い、今後の問題点も指摘したい。

2. 不規則波浪のシミュレーションシステム

図-1 は今回の研究で作成した不規則波浪のシミュレーションならびに解析システムのフローチャートである。図中の実線部分は On-line によるシステムの結合、破線は磁気テープを媒体とする Off-line によるシステムの結合を示す。このシステムには、次に示す2つのタイプの入力を使用可能である。

- (1) スペクトルあるいは自己相関関数の理論式、
- (2) 実測した現地波浪のスペクトルもしくは自己相関関数。

(1) 期待スペクトル

今回行った実験的研究において、システムへの入力データとしてはスペクトルの理論式を与えた。期待スペクトルとしては、深海において十分発達した風波のスペクトルと

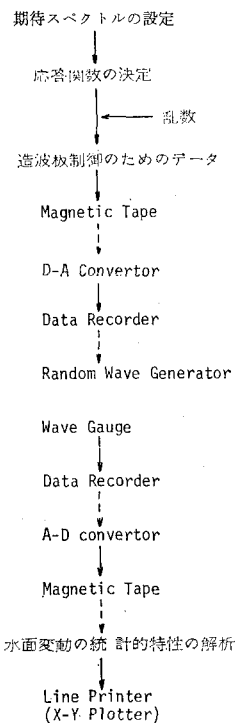


図-1 不規則波浪のシミュレーションならびに解析システム

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学教室

して通常よく用いられる Pierson-Moskowitz スペクトル, Neuman スペクトルならびに, うねりと風波のかさなりあった双峰型のスペクトルを採用した。これらのスペクトル型は一般的に次式で与えられる。

$$S(f) = \sum_{i=1}^N a_i f^{-m_i} \exp(b_i f^{-n_i}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで f は周波数 (H_z), a_i, b_i は風速, 吹走時間等により決定される定数である。また 2 つ以上のピークを持つスペクトルであれば, 式 (1) における和の上限 N はピークの数に対応させなければならない。式 (1) をスペクトルのピーク周波数 f_{pi} ならびにスペクトルのピーク値 $S(f_{pi})$ を用いて正規化すれば,

$$S(f) = \sum_{i=1}^N S_i(f_{pi}) \cdot (f/f_{pi})^{-m_i} \times \exp \left\{ \frac{m_i}{n_i} [1 - (f/f_{pi})^{n_i}] \right\} \dots \dots \dots (2)$$

となる。Pierson-Moskowitz スペクトル (Case-1) は式 (2) において, $N=1, m_1=5, n_1=4$, Neuman スペクトル (Case-2) は $N=1, m_1=6, n_1=2$ の場合である。また双峰型スペクトル (Case-3) としては, Pierson-Moskowitz スペクトルにうねりがかさなりあったものとして, $N=2, m_1=20, m_2=5, n_1=6, n_2=4$ とした。またピーク周波数は Case-1, 2 はともに $f_{p1}=0.5 \text{ Hz}$, Case-3 は $f_{p1}=0.15, f_{p2}=0.6 \text{ Hz}$ とした。またスペクトルのピーク値に対しては, 各スペクトルとも $S(f_{pi})=1.0$ として期待スペクトルを確定した。以上, 説明した期待スペクトルの特性をまとめて表-1 に示した。

表-1 期待スペクトルの特性

Case No.	Spectrum	m	n	$\mathcal{E}$	f_p	$s(f_p)$
1	Pierson Moskowitz	5	4	0.798	0.50	1.0
2	Neuman	6	2	0.768	0.50	1.0
3	Double Peaked	$m_1=20$ $m_2=5$	$n_1=6$ $n_2=4$	0.805	$f_{p1}=0.15$ $f_{p2}=0.60$	1.0 1.0

(2) 不規則波発生機の造波特性

一般に, かなり広い周波数帯にわたるエネルギーをもつ不規則波浪を発生させる場合, 不規則波発生機が周波数ごとに異なる造波特性を示すため, あらかじめそれに見合う量だけ期待スペクトルにひずみを与えておく必要がある。著者らの実験的研究^{2), 3)}によれば, 不規則波発生機の造波特性も規則波の場合と同様に, Biesel と Suquet の理論がほぼ適用できることが明らかになっている。本研究においては, 富永・橋本⁵⁾の用いた方法とは異なり, あらかじめ期待スペクトルそのものを, Biesel と Suquet の理論に基づいてひずみを与えておく方法をとった。

$$S^*(f) = S(f) \cdot [F(f)]^2 \dots \dots \dots (3)$$

$S(f)$ は式 (2) で与えた期待スペクトルであり, $F(f)$ は

ピストン型造波板の場合,

$$F(f) = \frac{\sin kh \cdot \cosh kh + kh}{2 \sinh^2 kh}$$

フラッター型造波板の場合は

$$F(f) = \frac{kh (\sinh kh \cosh kh + kh)}{2 \sinh kh (1 - \cosh kh + kh \sinh kh)} \quad (5)$$

で与えられる。ここで k は各成分波の周波数に対応する波数であり, h は水深である。結局式 (2) で示した期待スペクトルに対し, 式 (4), (5) に示す不規則波発生機の造波特性を考慮して, 式 (3) により計算した $S^*(f)$ を最終的な期待スペクトルとした。

(3) 乱数ならびに応答関数

ディジタル方式による不規則波浪のシミュレーション法において発生波に不規則特性を導入するためには, ホワイトノイズとほぼ同一の特性を有するディジタル化した熱雑音, あるいは計算機の乱数ルーチンを用いて発生させた擬似乱数を用いるのが一般的である。この研究においては, 次式で示す混合型合同方式による一様乱数を用いた。

$$x_{i+1} = aX_i + b \pmod{2^{35}} \dots \dots \dots (6)$$

$$(a = 2^8 + 1, b = 12345678901, X_0 = 12137516145)$$

この方式による乱数を平均値が 0, 分散が 1 になるように変換し, 次に述べる応答関数への random input data とした。

ディジタル方式のシミュレーション法における最大の問題点は, ホワイトノイズを入力とし, 所定のスペクトル特性を有するような不規則波形を出力することのできる応答関数を決定することにある。こうした応答関数の決定方法に関しては, 日野⁶⁾, Borgman⁷⁾ならびに著者らの理論的研究⁴⁾があるが, 著者らの研究を略述すると次のようである。

一般に図-2 に示すような線型回路 G に任意の離散的な入力 x_i が与えら

れた場合, その出力 y_i は回路の正の向きの単位衝撃応答関数を h_τ とすると次式で与えられる。

$$y_i = \sum_{\tau=0}^{\infty} h_\tau x_{i-\tau} \dots \dots \dots (7)$$

また, 同じ回路に逆向きの入力 y_i が与えられた場合, 回路よりの出力 x_i は回路の逆向きの単位衝撃応答関数を g_τ として

$$x_i = \sum_{\tau=0}^{\infty} g_\tau y_{i-\tau} \dots \dots \dots (8)$$

によって与えられる。式 (7) と式 (8) より, h_τ と g_τ との間には

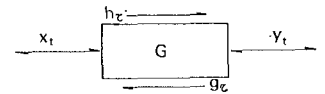


図-2 線型回路

$$\sum_{\tau=0}^t g_{t-\tau} h_{\tau} = \delta_t \quad (t=0, 1, 2, \dots, \infty) \dots\dots\dots (9)$$

なる関係が存在する。ここで式 (9) の δ_t は

$$\delta_t = 1 \quad (t=0), \quad \delta_t = 0 \quad (t \neq 0) \dots\dots\dots (10)$$

なるデルタ関数である。また、これとは別に回路 G に対しホワイトノイズを往復作用させて得た値と、その回路を通る以前の同じホワイトノイズとの差を最小二乗法の意で最小にするためには、

$$\sum_{n=0}^N g_n r_{t-n} = h_0 \delta_n \quad (n=0, 1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (11)$$

であればよい。ここで $r_n (n=0, 1, 2, \dots, N)$ は式 (7) における出力 y_t の自己相関関数である。また式 (11) において、和の上限は十分大きな数 N でおきかえた。式 (11) よりわかるように、期待スペクトルの自己相関関数 r_n が与えられれば、式 (11) と式 (9) を用いて回路 G の正負の向きの応答関数を決定することができ、式 (7) を用いて前述した乱数に対し、 h_{τ} を重みとする荷重移動平均をほどこすことにより所定のスペクトル形を有する不規則波形を計算することができる。この方法により計算した応答関数ならびに数値シミュレーションの結果が、きわめて良好な特性を有することはすでに述べた⁴⁾。

具体的な計算は、Case-1, 2, 3 も水深 40 cm においてピストンタイプの造波機を用いてシミュレーションを行うという条件で実施した。まず式 (2), (3), (4) により $S^*(f)$ を決定し、ついで Wiener-Khinchine の関係を用いて 0.05 sec 間隔で $S^*(f)$ の自己相関関数を決定した。

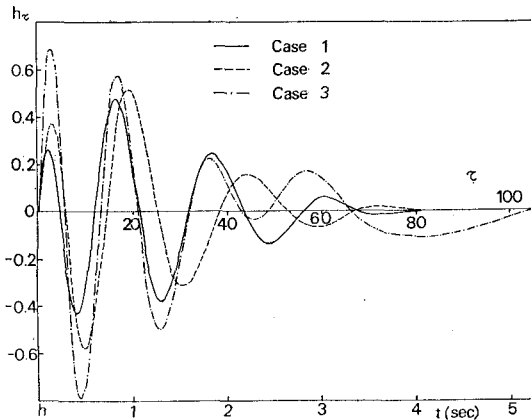


図-3 応答関数

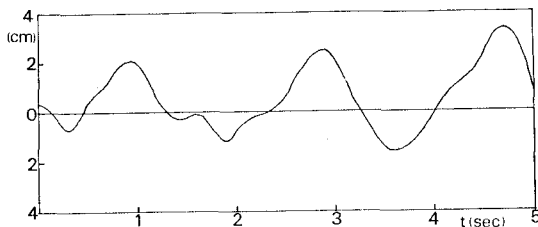


図-4 造波板の駆動信号の 1 例 (Case-1)

この自己相関関数を式 (11) に代入し、和の上限を $N=127$ とした後 Levinson⁸⁾ の方法により高速行列演算を行い、式 (9) とあわせて $h_{\tau} (\tau=0, 1, 2, \dots, N)$ を決定した。図-3 はこうして得た応答関数 h_{τ} を示したものであり、実線は Case-1、破線は Case-2、一点鎖線は Case-3 に対応するものである。式 (7) に基づき前述した一様乱数に対してこれらの応答関数を作用させて得た結果の一例を示したものが図-4 である。また各ケースとも不規則波形は 0.05 sec 間隔で 33,000 個のデータを計算した。これだけの計算を用いれば、27.5 分間のシミュレーション実験が可能である。ひきつづき、これらのデータを D-A 変換器を用いてアナログデータに変換し、ローパスフィルターを通じてデータレコーダーに記録し実験に用いた。

3. 実験方法

実験に用いた水槽は京都大学工学部土木工学教室の地下実験室に設置してある長さ 27 m、幅 50 cm、深さ 70 cm の両面ガラス張り水槽である。この水槽の一端に電気油圧式不規則波発生機が設置してあり、他端には $1/8$ 勾配のアルミメッシュ製スロープにステラシートを張りつけたものを設置し、消波工とした。造波板より 10 m の水槽中央に電気抵抗線式波高計を設置し水面の変動を記録した。電気油圧式不規則波発生機の詳細についてはすでに報告²⁾ したので省略するが、今回の実験においては、前節において示した方法によりデータレコーダーに記録してある不規則信号を、この不規則波発生機の外部入力端子より入力し、ピストン型造波板を駆動させた。この間、入力信号、造波板の変位信号をオシロスコープで常時モニターし、両者の間に位相・振幅のずれがないことを確認した。また波高計によって測定した水位の変動記録はペン書オシログラフでモニターしながらデータレコーダーに記録した。この記録は図-1 でも示したように、0.05 sec 間隔でデジタル化した後、磁気テープにファイルして随時取り出して種々の解析ができるようにした。

4. 実験結果ならびに考察

実験により得た水面変動の記録に対し種々の統計的な解析を行った結果を取りまとめて示したものが表-2 である。図-5 (a), (b), (c) は、それぞれ Case-1, 2, 3 の実験により得た水面変動の時間記録に対し、FFT 矩形フィルター法によりデータ数 8,192 個、自由度 82 でスペクトル解析した結果を示すものであり、図中には各ケースに対応するスペクトルの理論値もあわせて示した。図-5(c) のうねりに相当するスペクトルのピークが、理論値に比してかなり小さく平坦になっている点を除けば、各ケースとも理論値と実験値は非常によく一致して

表-2 不規則波浪の統計的特性

Case No.	$s(f)$ p_2 cm ² .sec	ε	Hmean (cm)	Hrms (cm)	H1/3 (cm)	H1/10 (cm)	Tmean (sec)	Trms (sec)	T1/3 (sec)	T1/10 (sec)
1	2.64	0.69	3.73	4.18	5.88	7.45	1.44	1.51	1.69	1.74
2	1.51	0.72	3.05	3.42	4.82	6.04	1.48	1.57	1.82	1.85
3	3.22	0.68	4.35	4.81	6.71	8.36	1.32	1.38	1.53	1.55

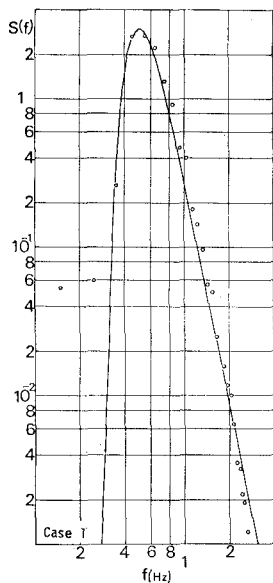
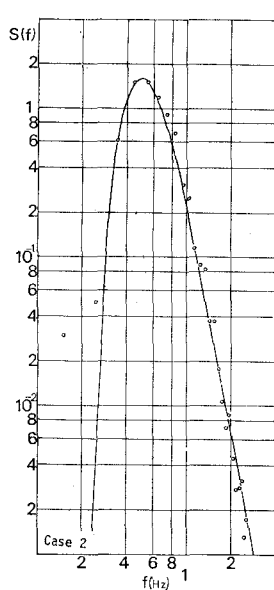
図-5 (a) Pierson-Moskowitz
スペクトル

図-5 (b) Neuman スペクトル

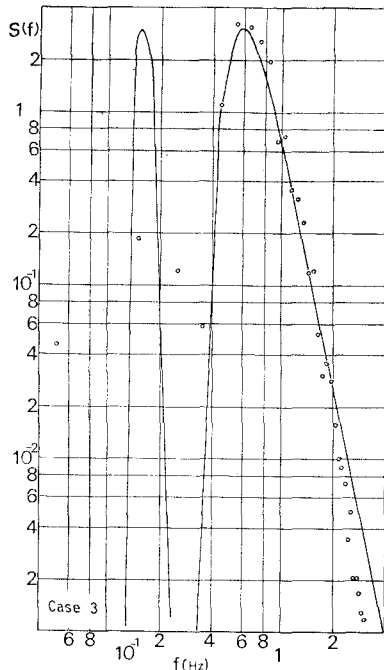
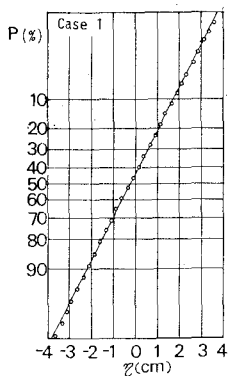
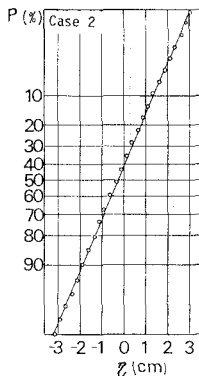


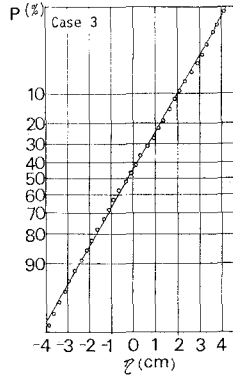
図-5 (c) 双峰型スペクトル



(a)



(b)



(c)

図-6 水位の超過確率

おり、良好な結果が得られたものと考えられる。図-5 (c) に関してはうねりに相当するピークのピーク周波数をいくぶん小さくとりすぎたため、実験結果が小さく平坦になったものである。図-6 (a), (b), (c) はそれぞれ Case-1, 2, 3 の実験により得られた 0.05 sec 間隔で 30,000 個の水位記録の超過確率を正規確率紙にプロット

したものである。各図とも実験値はよく直線に載っており、いずれの場合も水位は Gauss 分布をしていることがわかる。図-7 は各ケースについてゼロアップクロス法により決定した波高の超過確率を Rayleigh 確率紙にプロットしたものであり、Case-1 は 1,042 波、Case-2 は 1,012 波、Case-3 は 1,135 波のデータを取扱った。

図中の各点はほぼ完全に直線に載っており、いずれの場合もゼロアップクロス法により決定した波高の確率特性は Rayleigh 分布に良くしたがうことがわかった。図-8 はやはり実験により得られた水位の極大値の超過確率を示したものである。Cartwright と Longuet-Higgins の理論的研究によれば、今回の実験で用いた3つの期待スペクトル $[S(f)]$ のスペクトル幅に関するパラメーター ϵ の値は Case-1, 2, 3 に対してそれぞれ 0.80, 0.77, 0.80 であるが、表-2 でも示したように水面変動をもとにして計算を行った結果、それぞれ 0.69, 0.72, 0.68 で理論値に比していく分下まわっている。図-8 は $\epsilon=0.6$ に対応する確率紙であり、データ数は Case-1 が 1,393 波、Case-2 は 1,419 波、Case-3 は 1,452 波である。各図ともプロットした値はほぼ直線に載っているといえるが、それでもいく分上方にそっているのがわかる。これはピストンタイプの造波装置では 2 Hz 以上の高周波域における造波特性が Biesel と Suquet の理論に比して、いく分低下するためと考えられる。図-5 においても実験値が 2 Hz 前後より高周波側で、いく分理論値を下まわっているのがわかる。水位の極大値の決定に際しては、高周波成分の波が支配的な影響力を持つことから、水面変動より決定した ϵ の値は理論値よりもいく分小さい値となったものと考えられる。

5. 結 論

この研究は、今回完成したデジタル方式による現地波浪のシミュレーションシステムについて説明するとともに、3つの期待スペクトルの例を用いて、このシステムの特性を示したものである。このシステムにはスペクトルあるいは自己相関関数の理論式または現地観測によって得られた不規則波、その自己相関関数もしくはスペクトルの値の入力が使用可能であり、いずれの場合も長時間にわたり安定したシミュレーションの実験が可能である。また、実験結果によっても明らかなように、水槽中に発生させた不規則波浪の水面変動のもつ統計的な特性は、期待スペクトルや現地波浪の特性と非常によく一致しており、このシステムが非常に良好なものであることがわかった。したがって、この方法による不規則波浪を用いて行う種々の研究は、現地における現象を十分再現することができ、その結果はすぐに現地において利用できるものと考えられる。しかし、双峰型スペクトルのシミュレーションにおいて見られたように、このピストン形式の不規則波発生機では、超低周波もしくは超高周波の波は発生させることはできない。したがって、こうした周波数領域における不規則波浪のシミュレーションには長周期波もしくは短周期波の発生を目的とした別の

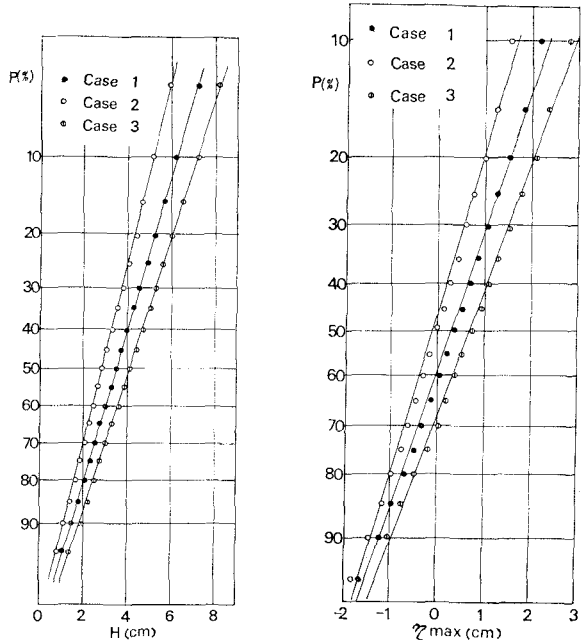


図-7 波高の超過確率 図-8 水位の極大値の超過確率

構造の造波機が必要となる。

最後にこの研究は昭和48年度文部省総合研究費による研究の一部であることを付記し感謝の意を表するとともに、この研究における計算ならびにデータのA-D、D-A変換は、すべて京都大学大型計算センターの FACOM 230-75 ならびに FACOM U-200 を用いて行ったことも付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) ニュース: 土木学会誌, 1974年1月号, pp. 104.
- 2) 岩垣雄一・村上仁士・酒井哲郎・木村 晃: 電気油圧式不規則波発生機について, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 409-419, 1970.
- 3) 岩垣雄一・木村 晃: 造波機による現地不規則波浪のシミュレーションに関する研究, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 131-135, 1972.
- 4) 岩垣雄一・木村 晃: 任意のスペクトル形を有する現地波浪のシミュレーション法に関する研究, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 463-468, 1973.
- 5) 富永正照・橋本 宏: 造波機による不規則波の発生, 第17回海岸工学講演会論文集, pp. 415-419, 1970.
- 6) 日野幹雄: 波浪の予測 フィルター 変換 フィルター, 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 21-28, 1967.
- 7) Borgman, L. E.: Ocean wave simulation for engineering design, Proc. ASCE, Vol. 95, No. WW4, 1969.
- 8) Levinson, N.: The Wiener RMS (root mean square) error criterion in filter design and prediction, J. of Math. and Phys., Vol. 25, pp. 261-278, 1947.