

循環式風洞水槽による風波の特性について

土 屋 義 人*・山 口 正 隆**

1. 緒 言

海岸波浪をシミュレートした不規則波の発生機の試作が各国で強力に進められ、すでに実用に供しうる段階に至っているものも少なくないことは周知のとおりである。わが国でも、最近各種の方式による不規則波の発生機が完成し、海岸水理学の基礎実験に用いられはじめた。著者らも、このような現状にかんがみて油圧を利用した機械的合成方式による発生機の製作に引き続いて¹⁾、新たに風洞水槽を利用した海岸波浪シミュレータを試作した²⁾。

一方、風波の発生や発達に関する実験的研究には、もっぱら直線風洞水槽が用いられてきたが、水槽の長さはたかだか 40~50 m 程度で吹送距離が短く、できるだけ大きな風波を発生させるために、風速を 40 m/sec 程度以上にも大きくしてきたようである。しかしながら、さほど大きな風波の発生は期待されず、有義波高で約 10 cm 程度、周期で約 1 sec 程度までと考えられ、風波の各種の実験において 1 つの障害になっていたといわれてよいであろう。1950 年ころソ連には円形の循環式大風洞水槽が建造され³⁾、各種の実験が行なわれたが、これに類似して前述したシミュレータはドーナツ型の循環式風洞水槽であるために、吹送時間を長くすれば、低風速においてもかなり大きな風波を発生させることができるので、この方面の研究にも大いに役立つものと考えられる。ここでは、この風洞水槽による風波の若干の特性とともに風洞水槽の 2, 3 の特性について述べる。

2. 風洞水槽の概要と実験方法

この風洞水槽の全体図は図-1 のとおりであり、その詳細についてはすでに報告してあるので²⁾、ここではその概要とこの研究において用いた実験の方法について述べる。

(1) 風洞水槽の概要

これは前述したように風洞水槽を利用して不規則波を発生させるものであるが、風洞は幅 0.5 m、高さ 1.5 m の長方形断面で図に示すようなドーナツ型とし、その中央部に直線部を設けて、円弧による風波の変形をできる

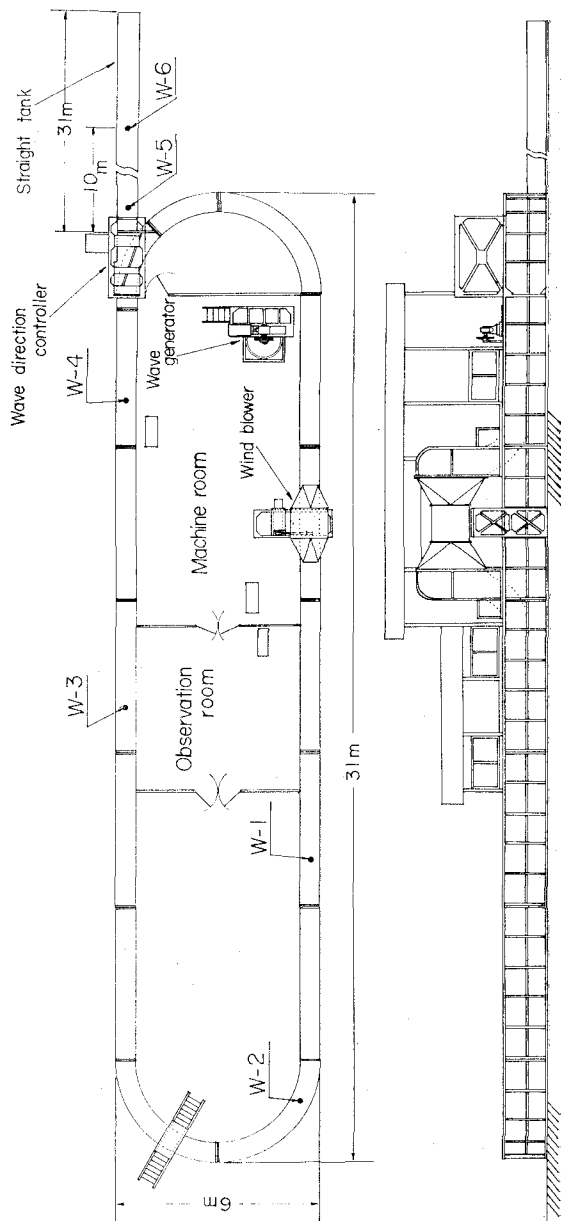


図-1 循環式風洞水槽（海岸波浪シミュレータ）の概要

だけ減少させるように考慮したものである。ドーナツ型風洞部の延長は約 68 m であり、不規則波の発生機として用いるために長さ 31 m の直線水槽を接続し、発生

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

**正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

した風波を波向制御装置によって風洞部から水槽部に出すようになっている。送風機は最大平均風速 25 m/sec より 3 m/sec まで変速できるものであり、また送風機の直前にはもぐりピストン型の造波機が設けられて、規則波に風波を合成させていわゆる long crested random waves も発生できるようになっている。波向制御装置の波向切換のための所要時間は約 0.2 sec 以内である。

この装置によって不規則波を発生させる場合には、あらかじめ検定した条件のもとに、ドーナツ型風洞部内に風波を発生せしめ、これが所定の特性となったときに波向制御装置を操作して直線水槽部に出すわけである。また、波向制御装置を開放した状態で用いれば、ほぼ通常の風洞と同じ条件で、定常状態での風波を発生させることもできるし、さらにドーナツ型風洞水槽で所定の条件のもとに任意の吹送時間に対して非定常な風波を発生させることができ、それは通常の風洞水槽と相違してかなり大きな風波まで発達させることが可能である。

(2) 実験の方法

以下述べる風波の特性に関する実験においては、図-1 に示す測点 W-1, 2, 3, 4 および W-5 において電気抵抗線式波高計によって波高を測定するとともに、ドップラー式超音波流速計(3方向測定用)および圧力計を用いてそれぞれ水粒子速度および波圧を測定した。

循環式風洞水槽においては、所定の風速にできるだけ短時間で制御し、風波の発達過程を各測点においてほぼ定常状態に達するまで同時記録した。また、循環式でなく通常の風洞水槽のようにして用いた場合にも、各測点において定常状態になるまで同時記録をとった。これらの場合、水深は 30 cm および 40 cm とした。不規則波の発生機として用いた場合には、任意の時間、循環式風洞水槽として所定の風速で風波を発達させてから、波向制御装置を操作して直線水槽部に風波をとり出し、測点 W-5 においてその記録をとった。

(3) 記録解析の方法

原則として、記録は平均波法およびスペクトル法によったが、後者では Blackman-Turkey の方法によりパワースペクトルを求め、同様にクロススペクトルおよびバイスペクトルを算出し、相互相関および風波の非線形性の検討に用いた。

3. 風波の発達特性

この循環式風洞水槽において発生する風波は、まず非定常状態におけるものであり、また循環式であるために、通常の直線式風洞水槽による風波と本質的に若干相違するわけであるので、これらの点について考察することにした。

(1) 発達特性

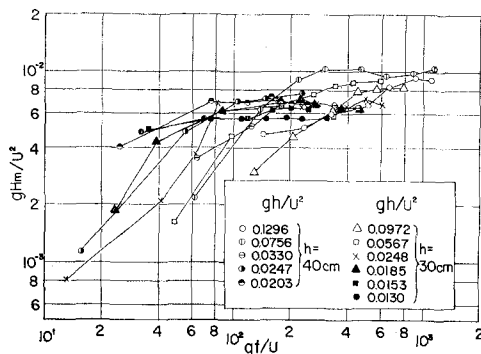


図-2 風波の発達特性(循環式の場合)

図-2 はこの風洞水槽における風波の発達特性を示したものであるが、便宜上平均波高 H_m および平均周期 T_m に対して平均風速 U をもってつくられる無次元量で表わしてある。前述したように、循環式でなく通常の風洞水槽と同じように、定常状態の風波の発達特性を調べた同様な実験結果と比較して、循環式の場合には、時間とともにかなり急激に発達し、特に低風速時においてより大きな風波を発生させることができた。図-3 および 4 はそれぞれ循環式とそうでない場合* における風波の発達に伴うスペクトルの変化を示したものであって、両者の風速が相違するけれども、定常および非定常

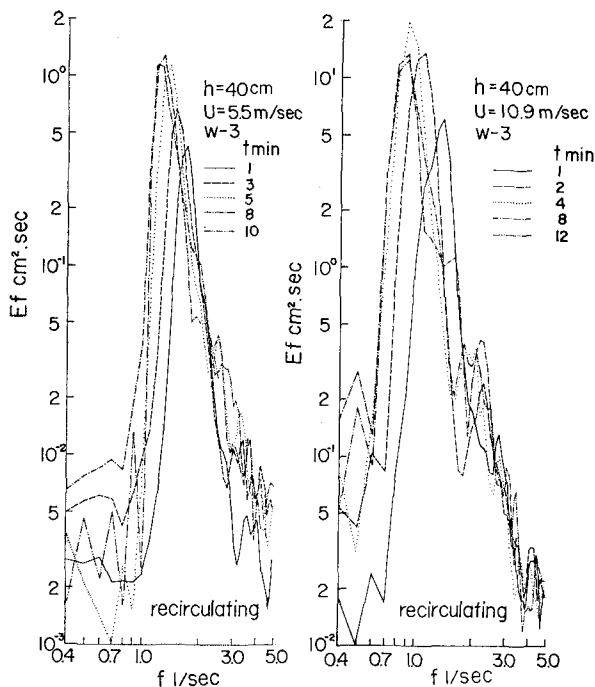


図-3 風波の発達に伴うスペクトル特性の変化(循環式の場合)

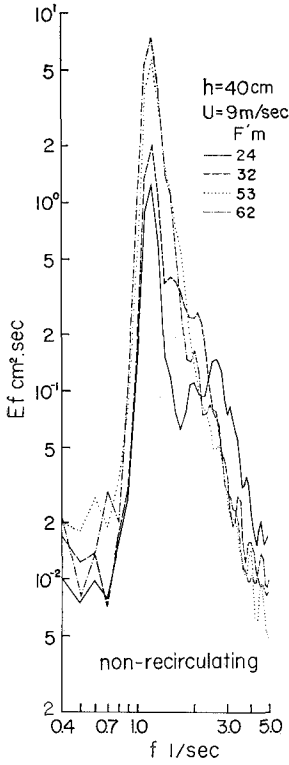
*図中においては、以後循環式の場合を recirculating といい、通常の風洞のように循環式でなく用いた場合を non-recirculating というようにする。

の風波のスペクトル特性において、高周波側の減法則は両者ともよく一致しているといえる。これに対して、図—3 においては吹送時間 $t \approx 8 \text{ min}$ におけるスペクトルと図—4 における吹送距離 $F' \approx 24 \text{ m}$ のそれとを比較すると、スペクトルのピーク値はほぼ同じであるが、前者では線型性の風波を、また後者ではピーク周波数と

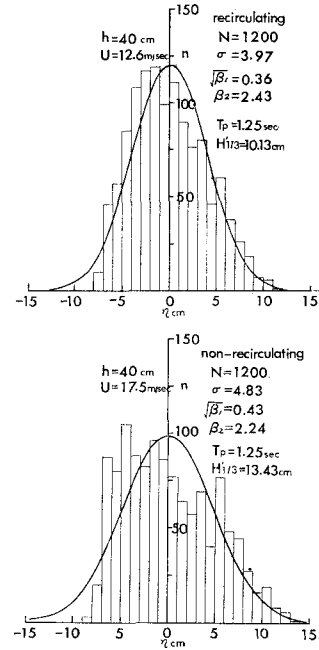
その倍周波数にピークのあらわれたかなり非線型性の強い風波となっている。このように、循環式の場合には、低風速において高波高で比較的線形性の風波を発生できるものと考えられる。なお、図—3 および 4 に示す風波について、それらのバイスペクトルを求めた結果が図—5 であるが、いずれの場合も現地の波浪⁴⁾ に比べて非線型性は小さいことがわかる。

(2) 水位および波高の分布特性

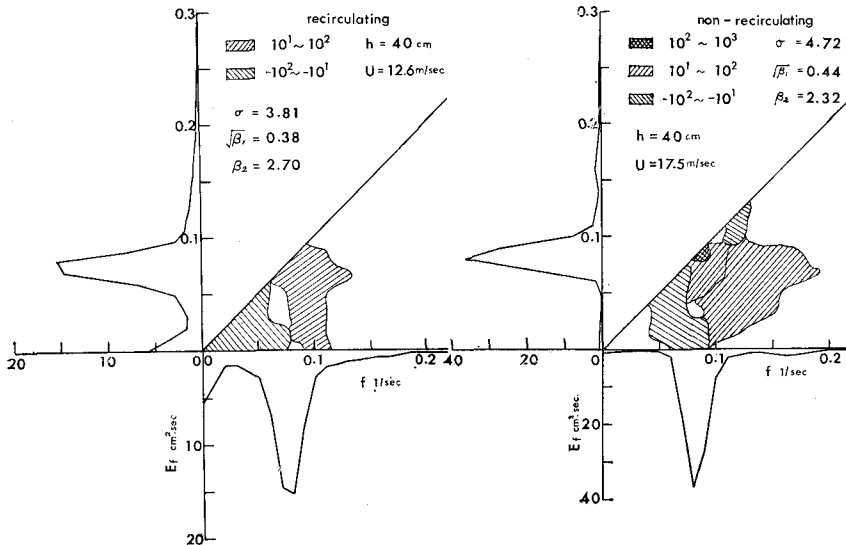
前述した 2 つの場合における水位変動と波高の分布特



図—4 吹送距離による風波のスペクトル特性の変化（循環式でない場合）



図—6 水位変動の分布特性



図—5 バイスペクトラ

性を検討するために、ここでは図-2 においてはほぼ定常になった風波と循環式でない場合において定常状態における風波の両者について比較する。図-6 は風速の大きい場合における水位変動 η を Gauss 分布と比較したものであり、図中にはサンプル数 N 、標準偏差 σ 、ひずみ度 $\sqrt{\beta_1}$ 、尖度 β_2 、ピーク周波数に対応した周期 T_p およびパワースペクトルから換算した波高 $H_{1/3}$ などを示してある。これら一連の実験結果から判断すると、比較的低風速時には Gauss 分布に近いが、高風速時になるとかなりひずみ度の値が大きくなり、このことは平均波法によるほぼ同一の特性をもつ風波に対しては、循環式の場合の方が顕著でない。また、図-7 は波高の分布を Rayleigh 分布と比較したものであるが、平均波高の増大とともに Rayleigh 分布より離れていくことがよくわかる。

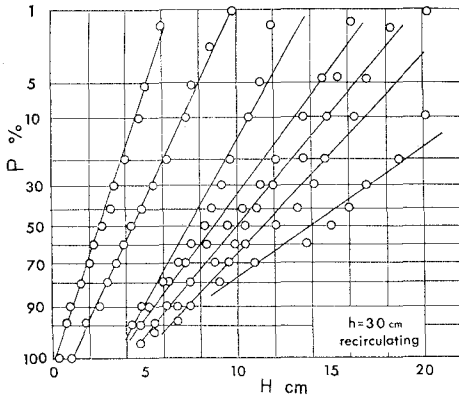


図-7 波高分布特性

図-8 は平均波法によって求められた平均波高 H_m 、有義波高 $H_{1/3}$ 、1/10 最大波高 $H_{1/10}$ および最大波高間の関係を示したものの 1 例であるが、循環式の場合とそうでない場合とを比較すると、前者の方が若干理論直線に近く、より大きな波高のところから離れていくことがわかる。

このことも、前述したスペクトルの特性や水位変動の

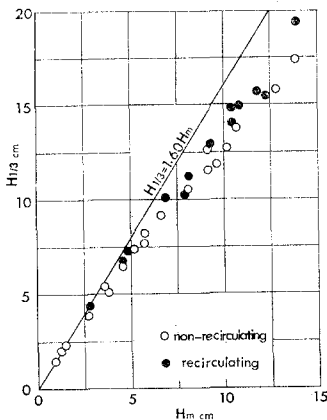


図-8 (1) 各種平均波高間の関係

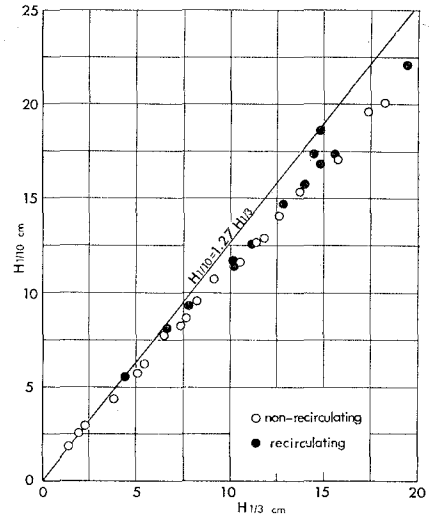


図-8 (2) 各種平均波高間の関係

分布などに関連して、循環式風洞水槽の 1 つの特徴によるものであろう。

(3) 水槽円弧部の影響

図-1 にみられるように、この風洞水槽には 2 つの円弧部があるので、風波の発達特性に及ぼす影響が問題となる。図-9 はほぼ定常状態になったときの図-1 に示

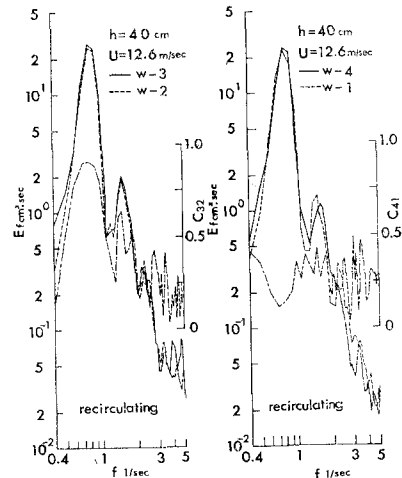


図-9 風波のスペクトルに及ぼす水槽円弧部の影響

す 4 つの測点における同一波群の記録を用いて、それらのスペクトル特性を示したものであり、図中には円弧部の前後の測点におけるそれぞれの記録について両者のコヒーレンスを計算して示してある。これからわかることは、スペクトル特性には円弧部の影響はほとんどないこととみてよいが、コヒーレンスの方は必ずしもよい相関を示していない。このことは、スペクトルの特性からもわかるように、かなり非線型性の強い波であるために、両者に線型的な相関が必ずしも保たれていないことを示すものであろう。

(4) 吹送流とその影響

循環式の場合には、一定の流体塊に風によるせん断力が作用するので、吹送流は時間とともに著しく発達する。図-10 は風波の発達に伴う吹送流の平均流速の時間的変化を示したものであるが、風速が約 10 m/sec を

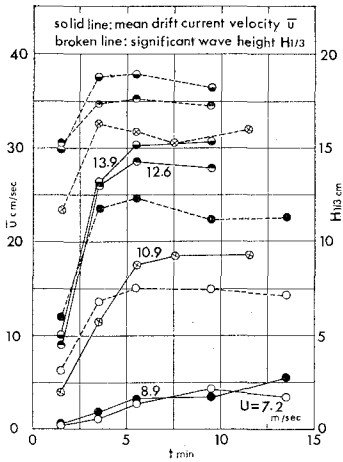


図-10 風波の発達に伴う吹送流の時間的変化

こえとかなり急激に増加することがわかる。この範囲におけるスペクトルを図-3 に示したが、吹送流の及ぼす影響については明らかではなく、また 図-11 にはこのときの波のパワースペクトルのほかこれと同時に測定した水粒子速度の水平および鉛直成分 (u および v) のスペクトルをも示したが、両者の間の関係をいちおう見出すことができる。さらに、図-12 は圧力変動のスペ

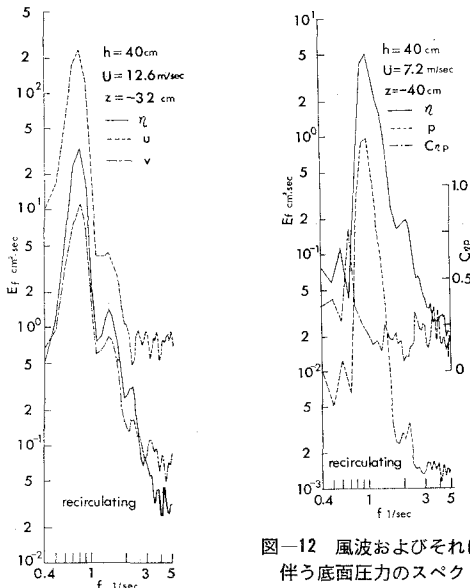


図-11 風波およびそれに伴う水粒子速度のスペクトル

図-12 風波およびそれに伴う底面圧力のスペクトルとコヒーレンスの変化

クトルとの関係を示し、水位変動 η と底面の圧力 p とのコヒーレンス $C_{\eta p}$ の変化を示したものであるが、その特異な変化が発生した吹送流によるのか明らかでない。

(5) 減衰特性

風洞内に発生した風波は、送風停止後摩擦その他によってしだいに減衰するが、図-13 は波高の時間的変化を示し、また 図-14 はこのときのスペクトルの変化を

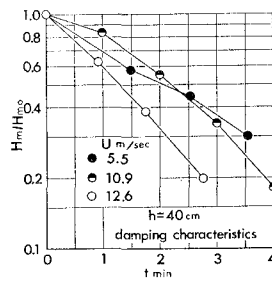


図-13 風波の減衰に伴う波高の変化

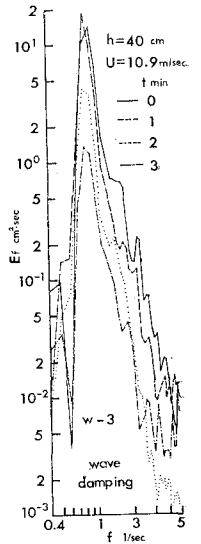


図-14 風波の減衰に伴う → スペクトルの変化

表わす。波高はほぼ指数関数的に減衰し、その減衰率は大きな風速を用いて発達させた場合の方が大きくなっているが、これは波の特性のほか吹送流の発達に関係するものと考えられる。このときのスペクトルの変化をみると、減衰に伴う全体的なスペクトルの変形はあまり顕著でないことがわかる。したがって、後述するようにこの水槽を不規則波の発生機として使用する場合には、この特性を生かして任意の発生波をとり出すことが可能であろう。

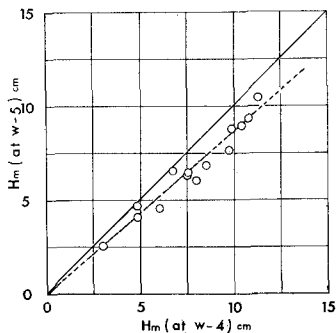
4. 不規則波発生機としての特性

循環式風洞水槽として発生させた風波を波向制御装置を操作して直線水槽部へとり出した波の特性について簡単に述べる。

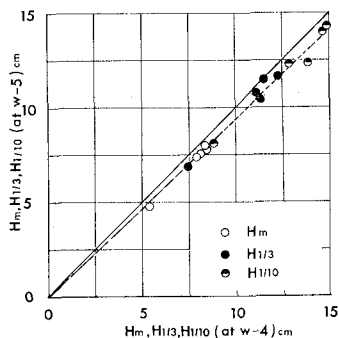
(1) 平均波法による特性

まず、図-15 (a) は定常状態になってからの風波をとり出して、測点 W-4 (風洞水槽内) と W-5 (直線水槽部) との平均波高を比較したものの一例であり、また図-15 (b) は定常状態に達するまでの各時点においてとり出した場合の各種平均波高の関係を示したものである。

いずれの場合も、とり出すことによって若干波高が小さくなるが、1つの関係で表わされるようであるので、実用上は十分であると考えている。また、周期についても全く同様な関係を検討したが、この場合には両者あま



(a) 定常状態の風波の場合



(b) 非定常状態の風波の場合

図-15 発生波の特性

り変わらなく、むしろ周期の長い場合にはとり出した波の方が若干大きくなる傾向を示すことがわかった。

(2) スペクトルの特性

図-16 は風洞水槽内での風波とこれを取り出した発生波のスペクトル特性とを比較し、また両者のコヒーレンスを求めたものの一例である。これから、図-15 に示したような特性を再確認するとともに、スペクトルそのものにおける大きな変化は起こらないことがわかる

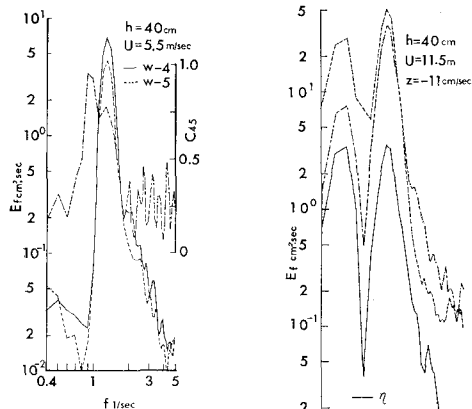


図-16 発生波のスペクトル特性

図-17 Long crested → random waves のスペクトル特性

が、コヒーレンシの傾向については十分明らかにされていない。さらに、風速の大きい場合においても、大体同様な傾向であることがわかっている。

5. Long Crested Random Waves の発生と 2, 3 の特性

比較的周期の長い波に風波が加わった場合のいわゆる long crested random waves の特性は、周期の相違する波の干渉問題として、きわめて興味深いものである。この風洞水槽では、造波機を併用することによって任意にこのような波を発生することができるので、その一例について述べる。図-17 は周期約 2 sec の規則波に風波を加えた場合の水位変動 η および水粒子速度の水平および鉛直成分 (u および v) のスペクトルを示したものであって、この種の波の若干の特性を知ることができる。

5. 結 語

以上、循環式風洞水槽における風波の特性を主として風洞水槽の特徴を中心として検討した若干の結果について述べた。基本的な問題点も少なくないが、かなり大きな風波の発達特性や内部機構の究明をはじめとして、不規則波の発生機としても十分実用性があるものと考えられるので、今後この方面の研究の進展に大いに役立てていきたいと考えている。紙数の関係上、かなり説明を省略した点も多いので、適当にご批判いただければ幸いです。

なお、本装置は文部省一般研究費によって製作したものであり、計画や設計においてご助言をいただいた矢野名誉教授、石原教授、岩垣教授および樋口助教授をはじめ、種々設計面においてご協力願った鳥取大学野田教授に謝意を表するとともに、設計および製作においてご配慮いただいた正豊工学実験装置製作所小牧所長に謝意を表明する。また、本実験の遂行にあたり熱心なご協力をいただいた芝野助手および実験資料の解析において熱心に助力願った岡本義夫君に謝意を表わすとともに、バイスペクトルの算出法などにおいてご教示いただいた立命館大学柿沼助教授に謝意を述べたい。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・土屋義人・石田昭: A generator of irregular waves and analysis of generated waves, Proc. 13th Cong. IAHR, Seminar No. 4, 1969.
- 2) 土屋義人・山口正隆: 風洞水槽を利用した不規則波の発生装置(海岸波浪シミュレータ)とその2, 3の特性について, 京大防災研年報, 第14号B, 1971(印刷中).
- 3) Schuleikin, W.W.: Theorie der Meereswellen, Akademie-Verlag, Berlin, 1960.
- 4) 柿沼忠男・石田 昭・門司剛司: 記録にもとづく海岸波浪の非線形性の解析, 第15回海岸工学講演会講演集, 1968, pp. 73-79.