

波と風の相互作用に関する研究

光 易 恒*

1. 緒 言

すでに波が存在している海面に急に風が吹きはじめた場合、あるいは風波の発生域に別の発生域より伝播して来た波が侵入して風域内で風波と共存する場合、これらの状況のもとに生じる現象を明らかにするため一連の実験的な研究を行なった。

このような状況は外洋のみならず沿岸付近においてもしばしば生じることが予想される。そして第1の問題を理論的に解決しようとすれば、風浪の発生理論たとえば、Miles (1957¹⁾, 1960²⁾) の理論などに立脚した問題への接近が考えられるであろう。第2の場合については、最近 Phillips (1963³⁾) が風波の発生域を通過するうねりの減衰機構として理論的モデルとその解とを導いている。しかしながら、実際にどのような現象がこれらの場合に生じるかを確かめた例はほとんど見当たらないので実験的にこれらの状況を再現してくわしく調べてみることにした。

予備的な実験において最初、前記の2つの場合に対応して、(i) 造波機で水槽内に一樣な進行波を起こしておいてそのうえに送風機で風を加える方法と、(ii) 最初に送風機で風を送って定常状態に達した風波を起こしておきその風域内に造波機で起こした一樣な波を送り込む方法と2つの場合についてそれぞれ測定を行なった。その結果、十分に時間が経過すればいずれの方法でもほとんど同じ最終的な平衡状態に達することがわかったので便宜的に実験は(ii)の方法によってすすめられた。

研究は現在まだ進行中であるけれども非常に興味のある結果が見出されたので一部の実験結果を発表することにする。

2. 実験装置および実験方法

この実験は津屋崎海洋災害実験所にある大型水槽(長さ70 m, 幅8 m, 水深2.9 m)を使用して行なわれた。

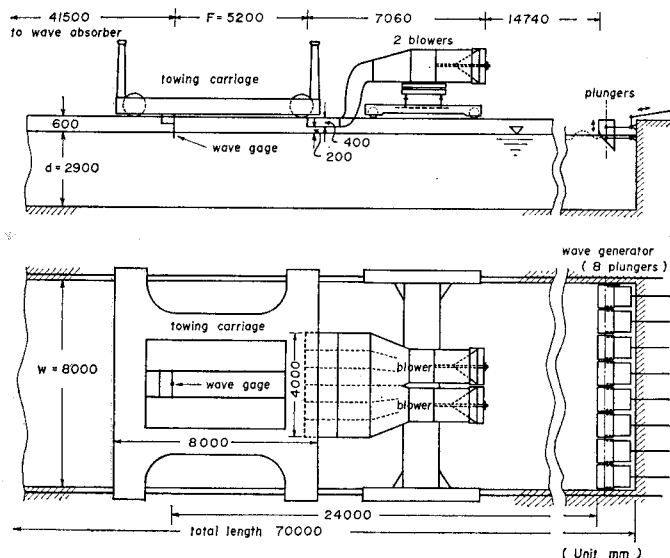
水槽の概略ならびに実験装置の配置は図

—1 に示したようなもので、水槽の中央部に送風台車を固定して風を吹かせ水槽の中央部から後方にかけて風波の発生域を再現した。一方水槽の一端にとりつけられたプランジャー型の造波機を使用して規則的な周期性の波を起こし、これを発生域内に送り込んだ。この造波機は8個のプランジャーより成り short crest の波を起こすことが可能であるが、この研究では現象を単純化するため long crest の波のみを用いた。

実験を行なった範囲の吹送距離では、風波が発生して定常状態に達するのに約2分間要することが確かめられたので、送風機を作働して風波を起こし、その2分後に造波機を作働し同時に風域内で波の記録をとることにした。

造波機で起こされた波が風波の発生域まで達するには少し時間を要するので波の記録のはじめの部分には風波のみが記録される。波の記録は同一条件について3分間記録し、定常状態に達した風波と規則波との共存系の記録が含まれている後のほうの2分間の記録を用いて各種の解析を行なった。風波と規則波との共存系の測定を行なうに先立って、無風時における規則波のみの測定ならびに規則波がないときの風波のみの測定を各実験条件についてそれぞれ行なった。規則波のほうは特定の波につ

図—1 大型水槽配置図(側面図および平面図)



* 正会員 理博 九州大学助教授
応用力学研究所

いては一つの断面(吹送距離)で測定しておけば原理的にはよいはずであるが特定の波の再現ならびに水槽の終端での消波を完全に行なうことは困難であるのでこれらの影響を補正するために各場所で測定した。

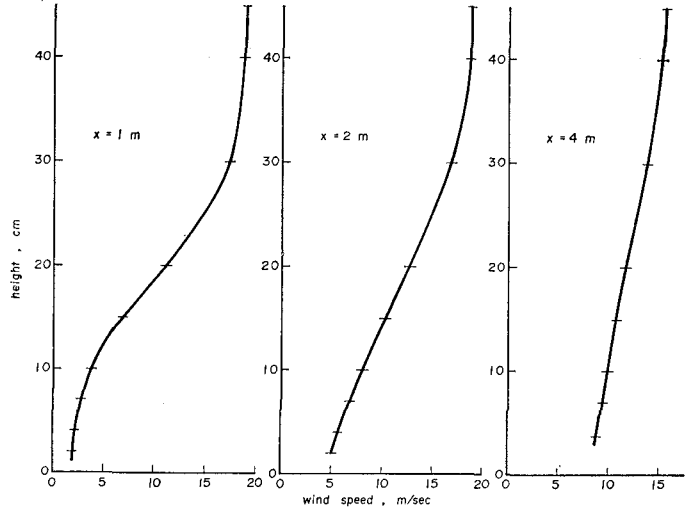
この実験を通じて風速は、送風機の吹出口でほぼ 20 m/sec に保たれた。送風機の吹出口は幅 4 m, 高さ 0.4 m で吹出口の下面はその下を造波機で起こした波が通過しなければならないので、水面上 0.2 m の高さにしてある(図-1 参照)。送風機がこのような特殊な形状をしていることは利点でもあるがそれはまた欠点でもある。すなわち、一般の風洞水槽のように風路の側壁や天井の影響がほとんどないので、この意味では実際の野外の現象に近いが、一方では風が拡散するために下流に向かってかなり風速が変化することになる。同様なことは風波についてもいえる。すなわち、水槽幅は 8 m であるのに送風機の吹出口の幅は 4 m であるためこの風域内で発生した風波は両側に拡がって行くことになる。

風の構造に関しては現在、詳細な測定を行なう計画をしているのでその結果を得た後あらためてくわしく報告する予定であるが、これまでに得られた結果よりつぎのような点が明らかにされた。送風機の吹出口の形状により、風は長方形の開口部より噴流のような形で吹出し、吹出口よりほぼ 1 m 下流で水面に接触する。そしてこの付近より水面の特性に支配される境界層が発達して行くので、有効吹送距離は吹出口より計った距離より約 1 m 短く考える必要がある。送風機の吹出口においては風速は鉛直方向にも横方向にもほぼ一様で約 $\pm 5\%$ 以内の変化で 20 m/sec であった。水槽の中心線に沿った 3 点で測定した風速の鉛直分布の一例は 図-2 に示すようなものであった。

波の測定は水槽の測定台車にとりつけられた容量型波高計^りを用いて行ない記録はビジ グラフ によって行なった。実験に使用した造波機による波の種類は 表-1 および 表-2 に示されたようなものである。これらの表には無風時の規則波の特性(w_a の欄)と風域内でのその特性($w_a + w_i$ の欄)とが一緒に記入されている。

今回報告する結果は 図-1 に示された吹送距離 $F=5.2$ m の場合のみであるが、実験はその後吹送距離を延長して、 $F=10$ m, $F=15$ m および $F=18.6$ m の場合についてそれぞれ行なわれた。これらの残りの実験結果は現在解析中であるので近い機会にまとめて発表する予定である。ただし、今回発表する範囲の結果は現在解析中の新しい資料を取り入れたとしてもそれほど変化は生

図-2 風速の鉛直分布(水槽中央線上)



じないことは確かめられた。

3. 実験結果

風波の発生域内に造波機で起こした規則波が通過する場合、風波と規則波が共存する系の定常状態は非常に早く達せられ規則波の波列が 2~3 波通過すればほぼ平衡状態に近くなった。この場合通過する規則波の波形勾配によっていちじるしい差が生じた。非常に波形勾配の小

図-3 (a) 波の記録 ($F=5.2$ m, $U=20$ m/s)

- (a) 風波 (b) 波(2-6)+風
- (c) 波(2-12)+風 (d) 波(0.8-4)+風
- (e) 波(0.8-6)+風

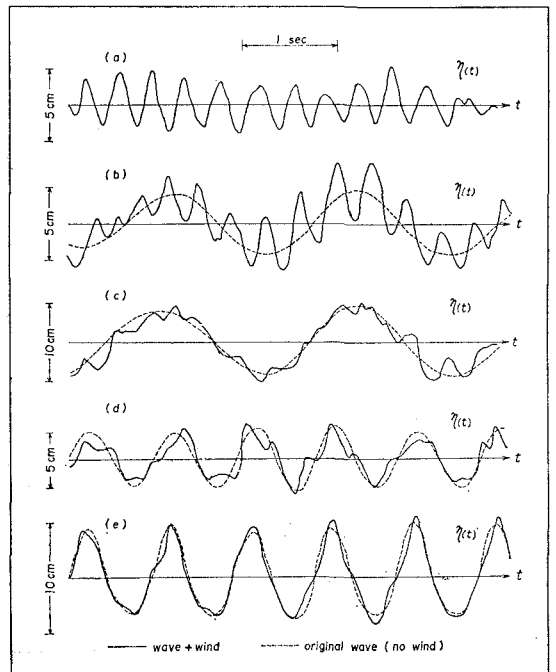
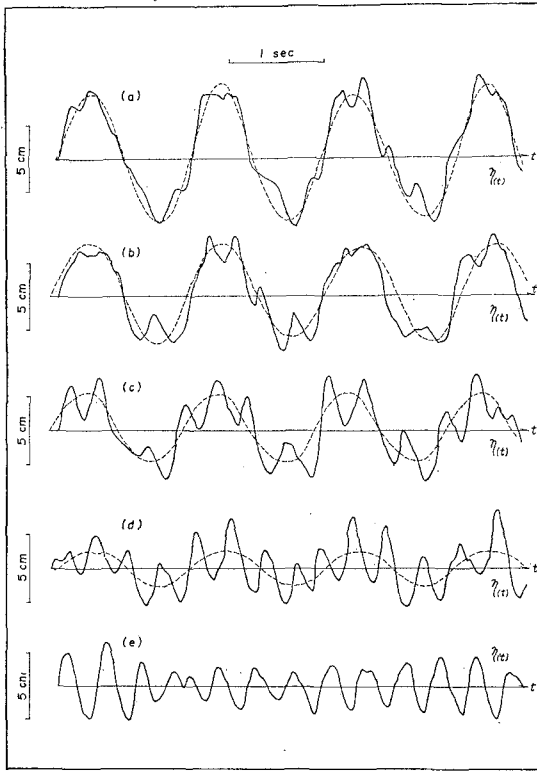


図-3 (b) 波の記録 ($F=5.2$ m, $U=20$ m/s)
 (a) 波 (1.4-10)+風 (b) 波 (1.4-7.5)+風
 (c) 波 (1.4-5)+風 (d) 波 (1.4-2.5)+風
 (e) 風波



きな波が通過する場合には、風域内の風波はほとんど変化しないで長波長の規則波の上に重畳した。このときの状況は 図-3 (a) の (b) に示された波の記録に明瞭にみられる。他方非常に波形勾配の大きな波が通過する場合には十分発達して飽和状態に達していた風波は急速に減衰して小さなしわ波のみが肉眼で観察された。しかしながらこの場合の波形記録図-3 (a) の (e) を注意深くみると、波高は非常に小さくなっているが支配的だった風波はなお存在していることがわかる。このことは後述する波のスペクトルに明瞭に見出された。

長波長の規則波と風波との非線型干渉 radiation stress^{5), 6)} を考慮すると規則波の山と谷で風波の波高が少し変化することが予想されるが 図-3 (a) の (b) にみられるようにこのような変化はほとんどみられない。これは、規則波の波形勾配が非常に小さいため非線型干渉が非常に

弱いこと、風波自体不規則に変動しているため、わずかな変化は識別することがきわめて困難なことなどによるものと考えられる。

図-3 (b) は第2の実験における波の記録の一部をまとめて示したもので、この実験では周期が等しく、したがって波長が同一で波形勾配が異なった4種類の規則波がそれぞれ風域を通過している。図-3 (b) によると、通過する規則波の波形勾配が増大するにつれて次第に風波が減衰して行く状況がよくわかる。図中、点線で記入されているのは元の規則波を重ねて画いたもので、これと風波と共存している規則波の記録とを比較してみると規則波自体はあまり変形していないことがわかる*。

波の記録より求めた風域内における規則波の諸特性は表-1 および 表-2 の $w_a + w_i$ の欄に示されている。

w_a の欄に示されている値は同じ波の無風時の値である。これらの表の下段のほうの値は波のスペクトルより求めた値でこれについては後述する。これらの表に示された結果より、風域内において規則波の周期は変化しないが波高（風波との合成波高）はいちじるしく増大していること、波高および周期の値の散乱が風波の発達が非常におさえられている場合にすくなく増大していることなどがわかる。

共存波のパワー スペクトル

風域内における風波と規則波との共存系の特性をさらにくわしく定量的に調べるために波の記録のスペクトル分析を行なった。2分間の記録を用いて市販のデータ処理装置（オートプロセス、CR 2050 型）によって波形を

表-1 実験に使用した規則波の特性 (1)

index of wave	2~6		2~12		0.8~4		0.8~6		wind wave
	w_a	$w_a + w_i$	w_a	$w_a + w_i$	w_a	$w_a + w_i$	w_a	$w_a + w_i$	
$\bar{T}$ (sec)	1.99	1.97	2.05	1.97	0.86	0.84	0.86	0.86	0.36
σ_T (sec)	0.03	0.10	0.02	0.09	0.01	0.04	0.02	0.03	—
$\bar{H}$ (cm)	4.0	6.5	7.5	9.2	5.2	5.3	7.9	8.3	2.3
σ_H (sec)	0.1	0.6	0.2	0.5	0.2	0.6	0.1	0.9	—
C (cm/sec)	311	—	320	—	134	—	134	—	56
C_g (cm/sec)	156	—	160	—	67	—	67	—	28
u (cm/sec)	6.3	—	12	—	19	—	29	—	—
L (cm)	617	605	655	605	115	110	115	115	21
H/L	0.0065	0.011	0.011	0.015	0.045	0.048	0.069	0.072	0.11
E (cm ²)	[2.02]**	2.78	[7.00]	7.27	[3.36]	2.53	—	—	1.02
E_1 (cm ²)	[2.02]	1.75	[7.00]	6.50	[3.36]	2.28	—	—	—
E_2 (cm ²)	—	1.03	—	0.77	—	0.25	—	—	1.02
H' (cm)	—	6.1	—	9.2	—	5.4	—	—	2.3
H_1 (cm)	—	3.7	—	7.2	—	4.3	—	—	—
H_2 (cm)	—	(3.7)* 2.4	—	2.0	—	1.2	—	—	2.3

w_a の欄：無風時の特性

$w_a + w_i$ の欄：風を加えたときの性質

$$C = \frac{g\bar{T}}{2\pi}, C_g = \frac{C}{2}, u = \frac{\pi\bar{H}}{\bar{T}}, L = \frac{g\bar{T}^2}{2\pi}$$

$$H_1 = \sqrt{8E_1}, H_2 = 2.32\sqrt{E_2}, H' = H_1 + H_2$$

* () 内の値は共存波の記録より風波を平滑化して直接に求めた規則波の平均波高

** [] の値は $E = \frac{\bar{H}^2}{8}$ として無風時の規則波の平均波高より求めた値

* ただし、これは規則波の波形勾配があまり大きくないためで現在解析中の波形勾配の非常に大きな波の場合にはかなり前傾する例もみられた。

表—2 実験に使用した規則波の特性 (2)

index of wave	1.4—10		1.4—7.5		1.4—5		1.4—2.5		wind wave
	w_a	w_a+w_i	w_a	w_a+w_i	w_a	w_a+w_i	w_a	w_a+w_i	
$\bar{T}$ (sec)	1.40	1.40	1.44	1.39	1.39	1.38	1.39	1.39	0.38
σ_T (sec)	0.02	0.06	0.01	0.09	0.01	0.12	0.03	0.10	—
$\bar{H}$ (cm)	10.0	10.3	7.1	8.8	5.0	6.8	2.4	5.5	3.0
σ_H (sec)	0.4	0.7	0.2	0.6	0.1	0.9	0.1	0.9	—
C (cm/sec)	218	—	224	—	217	—	217	—	59
C_g (cm/sec)	109	—	112	—	109	—	109	—	30
u (cm/sec)	22	—	16	—	11	—	5.6	—	—
L (cm)	306	304	323	302	302	297	302	302	23
H/L	0.033	0.034	0.022	0.029	0.016	0.023	0.0082	0.018	0.13
E (cm ²)	[12.42]	12.20	[6.37]	8.07	[3.08]	4.08	[0.74]	2.19	1.70
E_1 (cm ²)	[12.42]	11.58	[6.37]	7.22	[3.08]	3.01	[0.74]	0.83	—
E_2 (cm ²)	—	0.62	—	0.85	—	1.07	—	1.36	1.70
H_1' (cm)	—	11.8	—	9.8	—	7.3	—	5.3	3.0
H_1 (cm)	—	10.0	—	7.6	—	4.9	—	2.6	—
H_2 (cm)	—	1.8	—	2.1	—	2.4	—	2.7	3.0

(記号の説明は表—1 に同じ)

ディジタル化して紙テープにパンチした。このテープを用いて、九州大学計数施設の OKITAC 5090 H 型電子計算機により波のパワー スペクトルを計算した。計算法は Blackman & Tukey による標準的な方法⁷⁾ により、主要な定数は、サンプル間隔: 50 サンプル/3 秒, サンプル数 $N=2000$, 最大ラグ $m=42$, Nyquist frequency $f_N=8.4$ c/s, 分解能 $\Delta f=0.2$ c/s, 自由度 $\nu=95$, 90% 信頼限界 $0.8\phi(f)\sim 1.3\phi(f)$ である。

求められたスペクトルは図—4 (a), 図—4 (b), 図—4 (c) および 図—5 に示されている。図—5 は風波のみのスペクトルを対数目盛で示したものである。図—5 よりこの水槽で生じた風波のスペクトルは高周波側が f^{-5} よ

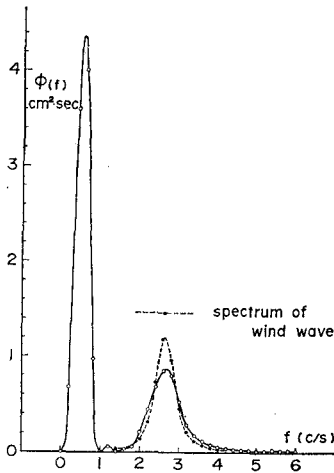
りかなり急でしかもスペクトルのピークの付近にかなりエネルギーが集まっていることがみられる。しかし一般に風洞水槽で起こされた風波のスペクトルは、このような傾向を示す場合が多いので必ずしもこの水槽の固有の性質とはいえないであろう^{8), 9)}。

図—4 (a) は 図—3 (a) の (b) の波の記録に対応するもので、非常に波形勾配の小さな規則波が風波と共存する場合の波のスペクトルである。最初のピークは規則波のスペクトルに対応し第 2 のピークは風波のスペクトルに対応し、周波数帯域が

離れているので両者は明瞭に分離されている。これより規則波のエネルギーと風波のエネルギーとを分離して定量的に取り扱うことが可能となる。この風波のスペクトルを図中に点線で示された規則波がないときの風波のスペクトルと比較すると両者は多少のエネルギー集中度の差を別とすれば、非常によく似ていることがわかる。図—3 (a) の (c) の波の記録に対応する波形勾配が少し大きな波の場合には 図—4 (b) に示されたように風波のスペクトルはかなり減衰している。図—4 (b) において規則波のスペクトルに対応する第 1 のピークと風波のスペクトルである第 2 のピークとの中間にある小さなピークは規則波の 2 倍周波数成分によるものである。ある条件

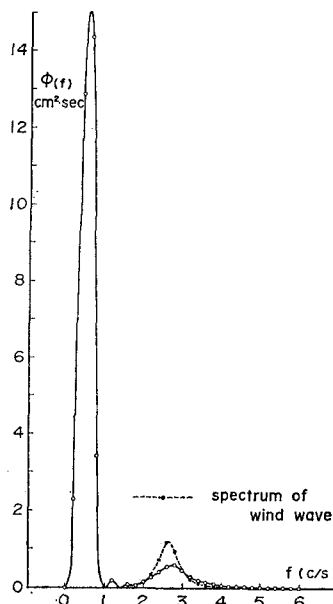
図—4 (a) 波のスペクトル

波 (2—6) に風を加えた場合の共存波のスペクトル (実線)



図—4 (b) 波のスペクトル

波 (2—12) に風を加えた場合の共存波のスペクトル (実線)



図—4 (c) 波のスペクトル

波 (0.8—4) に風を加えた場合の共存波のスペクトル (実線)

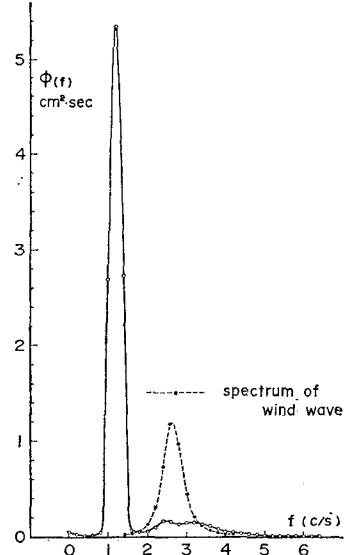
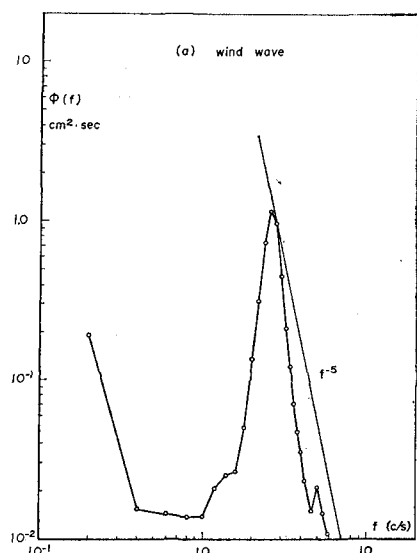


図-5 波のスペクトル
 $F=5.2$ m (有効 Fetch 約 4.2 m)
 $U=20$ m/sec (風波のスペクトル)



のもとにはこのような規則波の高調波成分がちょうど風波のスペクトルと同じ周波数帯に出現するので前述のようなエネルギーの分離が困難となる。図-4(c)は図-3(a)の(d)の波の記録に対応する波形勾配のかなり大きな規則波が風波と共存する場合のスペクトルを示す。これより波形勾配の大きな波が風域を通過すると風波はいちじるしく減衰することがわかる。図-4(b)および図-4(c)で注意すべきことは風波のスペクトルの減衰がスペクトルのピークの付近のみで主に生じ周波数帯域自体はあまり変化していないことである。そしてこのような特性は、図-6においてさらに明瞭に見られる。

図-6は第2の実験、すなわち波長は同一で波形勾配のみを異にする4種類の規則波を順次使用して行なった実験の結果を示し図-3(b)の波の記録に対応するものである。

図-6 波のスペクトル
 波 1.4—10, 1.4—7.5, 1.4—5, 1.4—2.5 にそれぞれ風を加えた場合の共存波のスペクトル

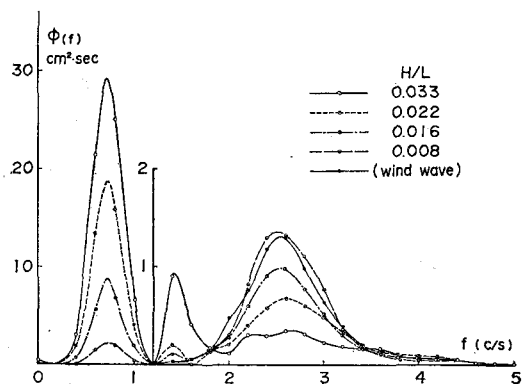


図-6には4種の波のスペクトルがまとめて示されているが、風波のスペクトルの詳細な性質を検討するために $f=1.2$ c/s より高い周波数側は縦軸が10倍に拡大してある。この図より、風域を通過する規則波の波形勾配が増大するにつれて風波のスペクトルが減衰し、しかもその減衰が風波のスペクトルのピークの付近のみで生じる状況がよくわかる。

風域内における風波と規則波との間のエネルギーの分配の関係を定量的に調べるために、規則波のみに含まれるエネルギー E_1 と風波のみに含まれるエネルギー E_2 をそれぞれのスペクトルを数値的に積分することによって求めた。このようにして求めた各エネルギーは共存系全体の波のエネルギー $E(=E_1+E_2)$ 、 E_1 および E_2 よりそれぞれ下記の関係式で求めた特性波高 H_1 、 H_2 およびその合成波高 $H'(=H_1+H_2)$ などとともに表-1および表-2の下の方の欄に示した。

$$H_1 = \sqrt{8} \sqrt{E_1}, \quad H_2 = 2.32 \sqrt{E_2}$$

前者は微小振幅波理論により規則波のエネルギーを波高に換算する式を示し、後者の定数は規則波がないときの風波のスペクトルと平均波高との実測値より定められた値である*。

表-1および表-2に示された結果より、上述のようにして求めた合成波高 H' は直接波の記録より読み取った波高の平均値に比較的によく一致することがわかる。

図-7 侵入波(規則波)の波形勾配による風波のエネルギーの変化

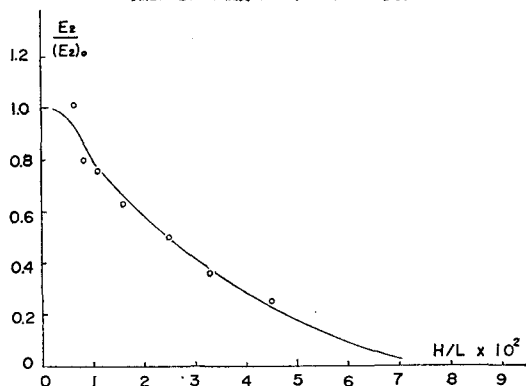


図-7は共存系における風波のみに含まれる波のエネルギーと、共存する規則波の波形勾配との関係を示したもので、縦軸には共存系における風波のエネルギー E_2 を規則波がないときの風波単独のエネルギー $(E_2)_0$ で割って無次元化した値 $E_2/(E_2)_0$ がとられている。前に図-6よりも予期されたように、規則波の波形勾配と共存する風波のエネルギーとの間には規則的な関係がみられ規則波の波形勾配の増大とともに急激に風波のエネルギー

* 風波の理論によると、この定数は $1.772^{(10)}$ となるが、この差は今回の場合、平均波高を読み取る際に非常に小さな波は無視したことによるものと考えられる。

一が減衰することがわかる。現在の実験結果を外挿して考えると、すでに存在している波の波形勾配 H/L が $0.06 \leq H/L$ の場合にはほとんど風波は新たには発生しないことになる。

一方、風域内を通過する規則波についてみると、風域内での風の作用ならびに風波の場との干渉などによりかなり影響を受けることが考えられる。表-1 および 表-2 に示された結果によると、風波を除去して規則波のみについてみると、いずれの場合も、順風を受けているにもかかわらず、波高がわずかに減衰していることがわかる。しかし今回の実験の範囲では波の特性との関連などはっきりした傾向はみられない*。

4. 結 語

われわれがここで取り扱っている現象の物理的な過程は第1近似としてつぎのように考えることができるであろう。(i) 最初風波の発生域内においては、風より風波へ伝達されるエネルギーと風波の場で消散されるエネルギーとが平衡状態を保ち風波は普通平衡¹¹⁾に近い状態にある。(ii) この風域内に規則波が侵入して来ると、風の場合はこの影響を受け風波へのエネルギーの伝達量は変化する。(iii) 侵入した規則波自身も風の影響を受け一方では風波の場との相互干渉を行ない変化する。そして(iv) 風波と侵入して来た規則波との共存する系の平衡状態が最終的に達成される。この場合、(v) 共存系の内部過程としては規則波をふくめた波の相互干渉、波の他の運動のモード、たとえば乱流運動や吹送流などとの干渉が行なわれ、外部より風により供給されるエネルギーをふくめて平衡状態が保たれる。

実験結果の理論的な検討は新しい実験結果の解析と並行して現在進行しているので別の機会に発表する予定である。最後に指摘しておかなければならないことは、今回の研究においては、風域を通過する規則波とそこで発生している風波とは周波数帯域をかなり異にしている点である。すなわち、風波の周期に対して規則波の周期がかなり大きい場合の現象を調べたことになる。したがって両者の周波数帯域が非常に接近した場合、あるいはほ

とんど等しい場合については新たに研究を行なうことが必要である。

謝 辞 本研究の遂行にあたり、終始ご鞭達とご配慮をいただいた九州大学名誉教授、栗原道徳博士に心より謝意を表します。また実験の遂行にあたっては当研究所沿岸海象力学部門の小森利雄、中山竜三、森田一浩、津屋崎海洋災害実験所の北統夫、田代昭生の諸氏の援助を受け、実験データの整理に際しては、小林和子、飯田陽子の両氏の助力を受け、計算機のプログラムその他に関しては水工土木学科の三根やす氏の協力を得た。これらの方々に厚く謝意を表します。

最後に本研究の一部は昭和41年度文部省科学研究費の援助を受けて行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Miles, J.W.: On the generation of surface wave by shear flows, Jour. Fluid Mech. 3 (2) 185-204, (1957).
- 2) Miles, J.W.: On the generation of surface waves by turbulent shear flows, Jour. Fluid Mech. 7 (3) pp. 469-478, (1960).
- 3) Phillips, O.M.: On the attenuation of long gravity waves by short breaking waves, Jour. Fluid Mech. 16, pp. 321-332, (1963).
- 4) 大路通雄・富岡 勝・中山龍三: あたらしい容量式波高計, 応用力学研究所所報, 第24号, pp. 21-31, (1964).
- 5) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart: Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents, Jour. Fluid Mech. 8, pp. 565-583 (1964).
- 6) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart: Radiation stress in water waves; A physical discussion, with applications, Deep Sea Research, Vol. 11, pp. 529-562, (1964).
- 7) Blackman, R.B. and J.W. Tukey: The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering, N.Y. Dover Publications, Inc. p. 190, (1958).
- 8) Hamada, Tokuchi: An experimental study of development of wind waves, Report of Port & Harbour Tech. Research Inst. No. 2, (1963).
- 9) Mitsuyasu, Hisashi: Wind wave in decay area, Report of Port & Harbour Tech. Research Inst. No. 5, (1964).
- 10) Longuet-Higgins, M.S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves, Jour. Marine Res. 11 (3), pp. 245-266, (1952).
- 11) Phillips, O.M.: The equilibrium range in the spectrum of wind generated waves, Jour. Fluid Mech., 4 (4), pp. 426-434, (1958).

* これは規則波が風の作用を受ける距離が短いため、現在解析している吹送距離の長い場合の実験結果においては、規則波の波形勾配とその波高の距離的变化との間には明瞭な関係がみられた。